„Über die Adsorption von Gasen an aktiver Kohle bei hohen Drucken“

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn

Von

Leopold Schaeben

aus M. Gladbach (Rhld.)

1939

Druckerei und Verlag wissenschaftlicher Werke Konrad Triltsch
Würzburg-Aumühle

Berichterstatter:

Prof. Dr. A. von Antropoff.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsverzeichnis.

Seite

1. Einleitung:
   a) Übersicht der bisher veröffentlichten Arbeiten über die Adsorption 1
   b) Zweck der Untersuchung 3

2. Experimenteller Teil:
   a) Beschreibung einer Apparatur zur Messung der Adsorption von Gasen an aktiver Kohle bei Drucken von weniger als 760 mm Hg bis zu 200 Kg/cm² 5
   b) Messung der Adsorption von Stickstoff, Argon und Krypton an aktiver Kohle 9
   c) Auswertung der Versuchsergebnisse 11

3. Theoretischer Teil:
   a) Ausbau der Theorie von Langmuir und Ableitung einer Gleichung für die Adsorptionsisothermen von kleinsten bis zu höchsten Drucken 38
   b) Diskussion der Versuchsergebnisse 42

4. Zusammenfassung 49

5. Literaturverzeichnis 50

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546405_0014

Übersicht der bisher veröffentlichten Arbeiten über die Adsorption.

Im Jahre 1777 berichten Scheele, de Saussure und Fontana zum ersten Mal über die Erscheinung der Adsorption. Es folgen Arbeiten von Angus Smith, Chappuis, Joulin, Kayser, Bunsen, Dewar, Baerwald, Mühlfart, Travers u. a. Die anfänglichen Arbeiten beschäftigten sich ganz allgemein mit der Feststellung einer „Gasverdichtung", der Abnahme der Adsorption mit steigender Temperatur, des Auftretens einer Wärmetönung, auch wird auf die Bedeutung der Größe und Struktur der Oberfläche hingewiesen. Grundlegend für die eingehendere Kenntnis der Adsorption sind die Arbeiten von Homfray, Titoff und Langmuir.

Da der Adsorptionsvorgang viel Ähnlichkeit mit dem Löslichkeitsvorgang von Gasen in Flüssigkeiten hat, untersuchte Titoff [1]), ob das Henrysche Gesetz den Adsorptionsvorgang wiedergeben konnte. Er stellte fest, daß die Adsorption in dem von ihm untersuchten Temperatur- und Druckgebiet besser durch die allgemeine Ostwaldsche Gleichung

$$A = A_0 \cdot p^{1/n}$$

wiedergegeben werden konnte, wo p der Gleichgewichtsdruck, A_0 die bei dem Druck von 1 mm Hg adsorbierte Gasmenge — für Adsorptiv und Adsorbens eine charakteristische Größe —, 1/n der Adsorptionsexponent ist. Die Zahl n ist immer größer als 1. Wird $n = 1$, so geht die Kurve in eine Gerade über, d. h. es gilt dann das Henrysche Gesetz:

$$A = k \cdot p$$

Titoff untersuchte H_2, N_2, CO_2 und NH_3 und nahm als Adsorbens Kokosnußkohle. Er stellte Isothermen bei —79°, 0°, 30°, 80° und 151,5° C auf; der höchste angewandte Druck war 760 mm Hg. Sättigungswerte fand er nicht, obwohl die Isothermen bei —79° C eine deutliche Krümmung aufweisen.

Langmuir [2]) benutzte Adsorbentien mit genau definierter Oberfläche und untersuchte H_2, N_2, O_2, Ar, CH_4, CO, CO_2, und zwar

[1]) A. Titoff: „Die Adsorption von Gasen durch Kohle". Z. f. phys. Chem. 74, 641 (1910).

[2]) I. Langmuir: „Die Adsorption von Gasen an ebenen Oberflächen von Glas, Glimmer und Platin". Journ. of amer. chem. Soc. 40, 1361 (1910).

Isothermen bei —183° und —118° C bei Drucken bis max. 0,1 mm Hg, um eine Kapillarkondensation zu vermeiden. Auch er fand eine Krümmung der Isothermen im pv-Diagramm zur Abszisse hin, eine Sättigung indessen fand auch er nicht. Seine Versuchsergebnisse gibt er durch die Gleichung

$$A = \frac{a \cdot b \cdot p}{1 + b \cdot p}$$

wieder, wo A die adsorbierte Gasmenge, a und b zwei für Adsorptiv und Adsorbens charakteristische Isothermenkonstanten sind; p bedeutet den Gleichgewichtsdruck. Die Grundlagen zu dieser Gleichung sind Langmuirs spezielle Anschauungen über das Wesen der Adsorption, die besagen, daß bei der Adsorption die Gasmoleküle an der Oberfläche der festen oder flüssigen Körper „kondensieren" und von Kräften festgehalten werden, die von den an der Oberfläche befindlichen Restvalenzen herrühren. Die Gasmoleküle sollen nach dem Festkleben wieder verdampfen. Die mittlere Zeit, die zwischen dem Anhaften und dem Verdampfen verstreicht, ist ein Maß für die Stärke der Adsorptionskräfte. Sind sie sehr stark, so wird die Verdampfung verschwindend klein und die Oberfläche wird mit einer Molekülschicht bedeckt sein. Bei reiner Adsorption, nimmt Langmuir an, soll diese Adsorptionsschicht monomolekular sein, weil ja dann die Oberflächenvalenzen, die nach ihm nur für die Adsorption verantwortlich gemacht werden müssen, gesättigt seien. Sind die Adsorptionskräfte schwach, so erfolgt die Verdampfung nach dem Anhaften so schnell, daß nur ein geringer Teil der Oberfläche bedeckt ist. Gemäß dem chemischen Charakter der Adsorptionskräfte nimmt Langmuir deren Wirkungsbereich mit 10^{-8} cm an. Mit Hilfe der Konstanten a und b berechnete er den Sättigungswert, den er als temperaturunabhängig bezeichnet.

I. W. Mc Bain [3]) veröffentlichte 1930 zum ersten Mal eine Arbeit über die Adsorption von Gasen und Dämpfen an Kohle bei hohen Drucken. Er stellte Isothermen von N_2O, C_2H_4 und N_2 bei Drucken bis max. 60 Kg/cm² auf und glaubt den Sättigungswert experimentell gefunden zu haben. Aus einer Untersuchung von A. S. Coolidge und H. J. Forwalt [4]) über die Adsorption bei hohem Druck von CO_2 an Kohle geht hervor, daß bei Drucken von etwa 70 atm aufwärts und bei einer Temperatur oberhalb der kritischen die Adsorption experimentell gemessen wieder abnimmt. Ebenso be-

---

[3]) I. W. Mc Bain: „The nature of the dorption by charcoal of gases and vapors under great pressure". J. of amer. chem. Soc. 52, 2198.

[4]) A. S. Coolidge: „Adsorption bei hohen Drucken". Journ. of amer. chem. Soc. 56, 544 und 561 (1934).

richten A. von Antropoff und Mitarbeiter[5]) in einer Mitteilung der Deutschen Bunsengesellschaft 1936 über die prinzipiellen Schwierigkeiten der Wiedergabe ihrer Adsorptionsmessungen bei Drucken bis etwa 200 Kg/cm² durch die bisher allgemein anerkannten Langmuirschen Vorstellungen.

Während der Anfertigung dieser Arbeit erschien dann noch eine Untersuchung über die Adsorption von CH_4 an Kohle von L. Coppens[6]) bis max. 380 atm. Auch er stellt eine Abnahme der Adsorption nach Erreichung eines Maximums fest.

Zweck der Untersuchung.

Da sich die Isothermengleichung von Langmuir aus der Gibbsschen Gleichung und der Zustandsgleichung der adsorbierten Phase (z. B. der Vollmerschen) herleiten läßt[7]), liegt es nahe, das gesamte Material der Adsorption einer genauen Durchsicht zu unterziehen, ob die Ursachen dieser Abweichungen in der Unvollkommenheit der Zustandsgleichung zu suchen sind oder ob auch andere Gründe vorliegen können. Um Klarheit in dieses Gebiet zu bringen, wurde am Bonner Chemischen Institut die Adsorption von Stickstoff und von Edelgasen in einem weiten Druck- und Temperaturbereich unter Benutzung derselben aktiven Kohle gemessen. Zweck dieser experimentellen Untersuchung war, die Adsorption der Edelgase Argon und Krypton im Anschluß an die Untersuchungen von F. Steinberg[8]) bis zu Drucken von 200 Kg/cm² zu messen und die Ergebnisse auszuwerten.

---

[5]) A. von Antropoff: „Die Adsorption von Stickstoff bei hohem Druck". Z. für Elektrochemie 39, 616 (1933) und „Die Adsorption von Argon und Stickstoff von kleinsten bis zu höchsten Drucken durch Kohle". Z. für Elektrochemie 42, 544 (1936).

[6]) L. Coppens: „Etudes sur la Nature du Gisement des Grisous". Rapport sur les travaux de 1936, Institut National des Mines, Frameries-Paturages 1937, S. 137.

[7]) siehe O. Blüh und N. Stark: „Die Adsorption". Sammlung Vieweg, Heft 93, S. 116.

[8]) F. Steinberg: „Die Adsorption von Stickstoff an Kohle bei hohen Drucken". Dissertation Bonn, 1933.

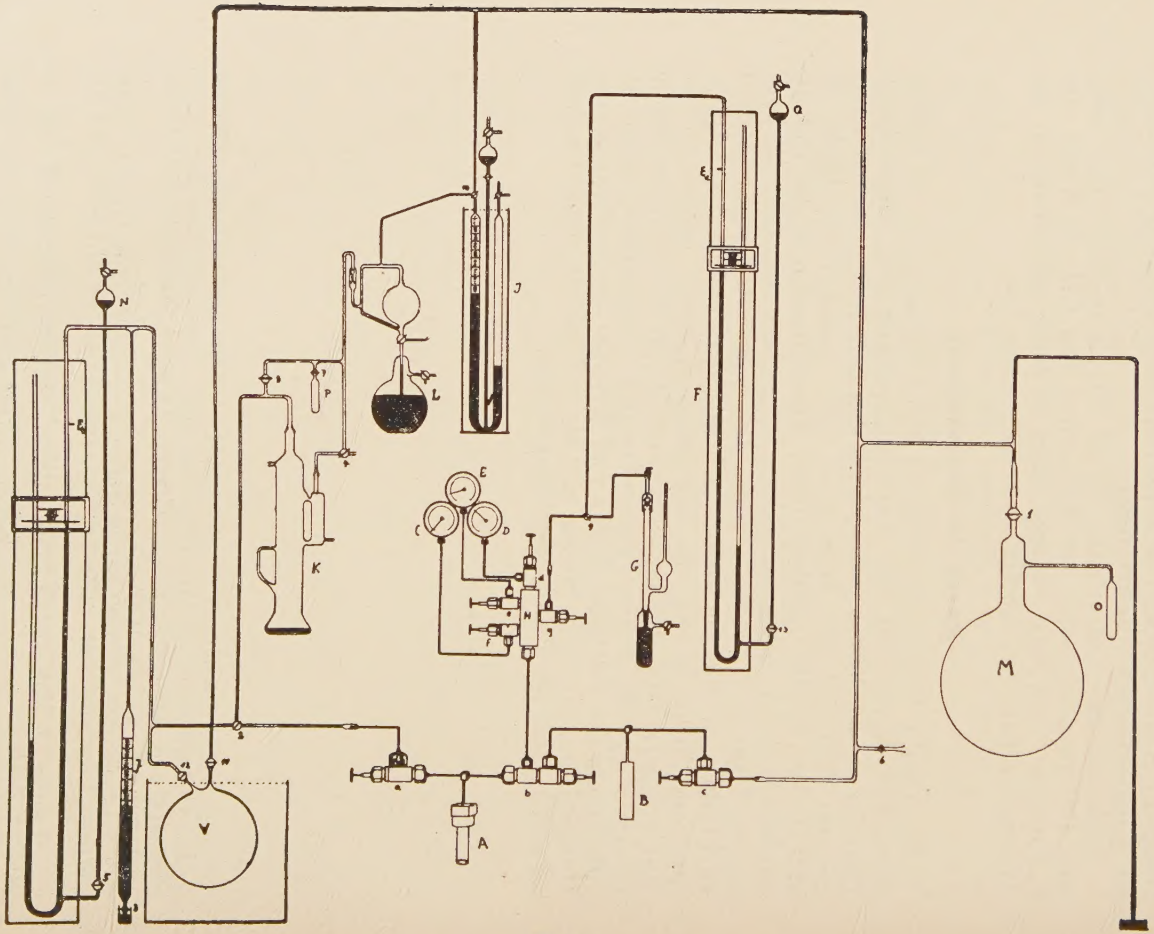

Fig. 1

Beschreibung einer Apparatur zur Messung der Adsorption von Gasen an Kohle bei Drucken von weniger als 760 mm Hg bis zu 200 Kg/cm².

Die Gesamtapparatur besteht — wie aus umstehender Zeichnung hervorgeht — aus

1. der Hochdruckseite,
2. der Meßseite,
3. der Rückgewinnungsseite.

Die Hochdruckseite setzte sich zusammen aus

a. dem Hauptautoklaven A,
b. dem Vorautoklaven B,
c. sieben Hochdruckfeinregulierventilen a, b, c, d, e, f, g (nach A. Hofer, Mühlheim),
d. drei geeichten Präzisionsmanometern C, D und E (von Schäffer & Budenberg),
e. einem hinter Ventil g angeschlossenen, offenen Quecksilbermanometer F,
f. einem ebenso hinter Ventil g angeschlossenen Mc-Leod-Manometer G,
g. den Verbindungsleitungen.

Die beiden Autoklaven A und B, die Ventile a, b, c, d, e, f und g, das dreifache T-Stück H und die Verbindungsleitungen waren für eine Druckbeanspruchung bis max. 500 Kg/cm² berechnet; der Werkstoff der beiden Autoklaven war Kupfer, dessen Festigkeit weitgehend temperaturunabhängig ist.

Die Manometer C, D und E von Schäffer & Budenberg hatten verschiedene Meßbereiche; so hatte C einen Meßbereich von 1 bis 200 Kg/cm² und war in 1 Kg/cm² unterteilt, so daß 0,1 Kg/cm² noch geschätzt werden konnten. Der Meßbereich von Manometer D war von 1 bis 50 Kg/cm², so daß bei einer Unterteilung von 1/5 Kg/cm² noch 0,02 Kg/cm² geschätzt werden konnten; schließlich hatte Manometer E einen Meßbereich von 1 bis 15 Kg/cm², eine Unterteilung von 1/10 Kg/cm², so daß 0,01 Kg/cm² geschätzt werden konnten. Das Quecksilbermanometer F und das Mc-Leod-Manometer dienten zur Druckmessung von 760 mm Hg abwärts.

Die Verwendung der drei verschiedenen Hochdruckmanometer war aus Interpolationsgründen bei der Auswertung der Versuchsergebnisse erforderlich, da die Messung der adsorbierten Gasmenge mit der Desorptionsmethode vorgenommen wurde, wobei — um bei hohen Drucken von den Gasgesetzen unabhängig zu sein — zwei Versuchsreihen nebeneinander ausgeführt wurden, ein Adsorptionsversuch mit Kohle und eine Messung, bei der die Kohle durch ein Füllstück aus Messing von gleichem Volumen er-

setzt ist. Sämtliche Manometer konnten mittels der Ventile und Hähne gegeneinander abgeschlossen werden.

Der Autoklav A enthielt 1,000 g Kohle A. K. $T._{II}$ (I. G. Farbenindustrie), das schädliche Volumen war durch ein Füllstück aus Messing vermindert. Der Autoklav B enthielt etwa 10 g aktive Kohle. Da die Apparatur evakuiert wurde, mußten die Ventile hochvakuumdicht sein. Deshalb wurde als Packmaterial für die Stopfbüchsen eine Fettschnur verwandt, die in Hochvakuumfett getränkt war.

Die Verbindungsleitungen bestanden aus biegsamem Kupferrohr mit 1,5 mm l. W. und hatten eine Wandstärke von 2 mm. Auf diese waren die Dichtungskegel mit Silber hart gelötet. Alle Dichtungen erfolgten Metall auf Metall durch Kegel und Überwurfmutter. Sämtliche Verbindungsleitungen waren zur Verminderung des schädlichen Volumens mit Kupferdraht von 1,3 mm Durchmesser gefüllt. Die Verbindungsleitungen zu den Hg-Manometern waren aus Kapillarrohr.

Zur Meßseite gehörten

a. ein geeichtes Meßvolumen V mit den Verbindungsleitungen und einer angeschmolzenen Meßbürette als Eichvolumen dieser Verbindungsleitungen,
b. ein Hg-Manometer mit Zubehör,
c. ein Thermostat von etwa 50 l Inhalt,
d. die Meßbürette I mit Wassermantel,
e. die Quecksilberpumpe K,
f. die Töplerpumpe L und die Verbindungsleitungen.

Die unter a. bis c. genannten Teile der Meßseite dienten zur Messung größerer, bei den Adsorptionsversuchen bei hohen Drukken freiwerdenden Gasmengen. Die unter d. bis f. genannten dienten zur Messung kleiner Gasmengen bei Drucken von 760 mm Hg abwärts. Die beiden Teile dieser Meßseite konnten mittels Hahn 2 gegeneinander abgesperrt werden.

Das Volumen des Meßkolbens V wurde bei 18° C zu 1764,0 cm^3 bestimmt. Die Eichung der Verbindungsleitungen des Teiles I geschah wie folgt:

Als Eichvolumen diente die Bürette J, die in 0,2 cm^3 unterteilt war, so daß 0,02 cm^3 noch geschätzt werden konnten. Zur Eichung selbst wurde in dieses Eichvolumen Quecksilber bis zu einer beliebigen Höhe durch den Hahn 3 angesaugt. Darauf wurde aus dem Vorratsgefäß M soviel Gas einströmen lassen, daß die Meßseite noch etwas Unterdruck zeigte. Der Hg-Stand im rechten Manometerschenkel wurde sodann mittels des Vorratsgefäßes N auf die Einstellmarke E_1 gebracht und der Druck abgelesen. Dann

wurde das Quecksilber aus der kalibrierten Röhre durch den Hahn 3 wieder bis zur Kükenbohrung abgelassen; der Hg-Stand im Manometer wurde wieder mit Hilfe des Quecksilbervorratsgefäßes N auf die Einstellmarke E_1 gebracht und der Druck abgelesen. Auf diese Weise wurden drei Messungen ausgeführt. Nach den Gasgesetzen berechnet sich dann das Volumen V_x der Verbindungsleitungen nach der Formel:

$$V_x \cdot p_1 = (V_x + V_E) \cdot p_2$$

oder

$$V_x = \frac{V_E \cdot p_2}{p_1 - p_2}$$

In dieser Formel bedeuten:

V_E das an der Bürette abgelesene Volumen,
V_x das unbekannte Volumen der Verbindungsleitungen,
p_1 der zum Volumen $V_E + V_x$ gehörige Druck in mm Hg,
p_2 der zum Volumen V_x gehörige Druck in mm Hg.

Tabelle I. gibt die Ergebnisse der Messungen wieder.

Tabelle I.

p_1	p_2	V_E	V_x
714,5	613,2	24,2	145,2
701,2	592,0	27,0	145,1
698,6	584,9	28,5	145,5

Im Mittel beträgt das Volumen der Verbindungsleitungen also 145,2 cm^3. Das Gesamtvolumen des Teiles I. der Meßseite ist demnach

$$1764{,}0\ cm^3 + 145{,}2\ cm^3 = 1909{,}2\ cm^3.$$

Für die Rückgewinnungsseite war ein 6 l fassender Kolben M vorgesehen, in den das Gas mit Hilfe der Adsorptionskohle 0 zurückgewonnen werden konnte. Der Rückgewinnungskolben diente gleichzeitig als Vorratsgefäß.

Vor Beginn der Versuche wurde die gesamte Apparatur mit einem Aggregat einer Quecksilberhochvakuumpumpe evakuiert. Aus praktischen Gründen wurde hierzu dieselbe Pumpe K der Meßseite genommen, die über den Hahn 4 dem Vorvakuum einer Ölkapselpumpe angeschlossen werden konnte. Die Evakuierung erstreckte sich wegen der engen Kupferrohrkapillaren über mehrere Stunden. In der Hochdruckseite wurde mit dem Mc-Leod-Manometer ein Druck von 0,05 mm Hg nachgewiesen; ein höheres

Vakuum konnte wahrscheinlich wegen der Oklusion von Gasen im Metall nicht erreicht werden. Die andren Teile der Apparatur wurden bis zur Entladungsfreiheit leergepumpt.

Da ein Teil der Vorvakuumleitung später durch Umschalten des Dreiweghahnes 4 zum Teil II. der Meßseite benutzt wurde, war es nötig, diesen Teil ebenfalls bis zur Entladungsfreiheit zu evakuieren. Das geschah mittels der Adsorptionskohle P, so daß auch hier das gewünschte Hochvakuum erreicht wurde.

Da Isothermen von verschiedenen Gasen aufgenommen wurden, waren verschiedene Vorratskolben M vorgesehen, die mittels Schliff angesetzt werden konnten. Gemessen wurden Isothermen von Stickstoff (als Vergleichsisothermen der Untersuchungen von F. Steinberg [9]), von Argon und Krypton.

Der Stickstoff wurde durch thermische Zersetzung von Natriumazid im Hochvakuum gewonnen. Zu diesem Zweck wurden 5 g Natriumazid mit der dreifachen Menge reinen, trocknen Quarzsandes gemischt in einem schwerschmelzbaren Glasrohr durch Schliff an Hahn 6 angesetzt. Zur Reinigung des Sandes wurde dieser zuerst mehrere Stunden mit Wasser gewaschen, dann längere Zeit mit konz. HCl und konz. HNO_3 gekocht und schließlich solange mit destilliertem Wasser gewaschen, bis im Waschwasser keine Cl- bzw. NO_3-Ionen mehr nachweisbar waren. Nach dem Trocknen wurde er dann mit der angegebenen Menge Natriumazid gemischt und mit diesem wie oben beschrieben an die Apparatur angesetzt. Unter stetigem Abpumpen im Hochvakuum wurde das Gemisch zunächst langsam auf 280° C erhitzt. Nach etwa einer Stunde wurde die Temperatur langsam auf 360° C gesteigert. Bei etwa 330° C setzte eine schwache Stickstoffentwicklung ein, dieser wurde aber noch abgepumpt und erst der sich bei 360° C bildende wurde dann in dem vorher evakuierten Vorratskolben M aufgefangen.

Das verwendete Argon wurde in 99,6% Reinheit von der Firma „Gesellschaft für Lindes Eismaschinen" in Höllriegelskreuth bei München zur Verfügung gestellt. Das Gas wurde in einer Bombe geliefert und diese wurde mittels Schliff über Hahn 6 an die Apparatur angeschlossen. Nach dem Evakuieren der Zuführungsleitungen wurde die Apparatur mehrmals mit Argon ausgespült und dann der Vorratskolben damit gefüllt.

Krypton wurde von der Firma Griesheim-Elektron in spektralreinem Zustand in Glaskolben geliefert, die ebenfalls nach dem Evakuieren der Apparatur mittels Schliff über Hahn 6 an die Apparatur angesetzt werden konnten. Nach der Zerstörung des Zerschlageventils wurde das Gas dann in den evakuierten Vorratskolben M eingelassen.

[9]) F. Steinberg: loc. cit.

Messung der Adsorption von Stickstoff, Argon und Krypton an aktiver Kohle.

Nach dieser Vorbereitung der Apparatur wurden 14 Adsorptionsisothermen aufgenommen, und zwar 3 Vergleichsisothermen mit Stickstoff bei 0°, —37,5° und —104° Celsius; ferner 7 Argonisothermen bei den Temperaturen 200°, 150°, 100°, 50°, 0°, —60,0° und —79,5° Celsius; mit Krypton wurden 4 Isothermen aufgenommen und zwar bei 50°, 28°, 0° und —41,5° Celsius. Die Temperaturreglung geschah abgesehen von den 0° C Isothermen, wo fein zerkleinertes Eis und dest. Wasser genommen wurde, stets automatisch. Bei den Temperaturen 28° und 50° C diente als Thermostatenflüssigkeit Wasser und als Heizvorrichtung eine 100-Wattlampe, bei den Temperaturen 100°, 150° und 200° C als Thermostatenflüssigkeit ein hochsiedendes Öl und als Heizvorrichtung ein Tauchsieder von 1000 Watt. Bei den Temperaturen unter 0° C wurde anstatt der Thermostatenflüssigkeit ein Aluminiumzylinder verwandt, der durch Stoffüberzug geschützt sich in einem Dewar-Gefäß befand. Der Aluminiumzylinder hatte vier Bohrungen. In die größte konnte der Meßautoklav genau passend eingelassen werden, in die zweite das Thermometer, in die dritte ein „Haage-Temperaturregler", in die vierte endlich tropfte die durch den Haage-Temperaturregler zur Kühlung dienende flüssige Luft. Sämtliche Temperaturen konnten bis auf $\pm$ 0,2° konstant gehalten werden. Als Thermometer für die Temperaturen von 0° C aufwärts diente ein geeichtes Thermometer der Firma Gerhardt, Bonn; für die Temperaturen unterhalb 0° wurde ein Platin-Widerstandsthermometer benutzt, dessen Widerstandsänderung in einer Wheatstonschen Brücke gemessen wurde.

Zur Messung der Adsorption wurde die Desorptionsmethode angewandt. Um im Meßautoklaven einen Anfangsdruck von etwa 200 Kg/cm² zu erhalten, wurde wie folgt verfahren:

An die 10 g aktive Kohle des Vorautoklaven B wurde der größte Teil des im Vorratsgefäß M vorhandenen Gases durch Kühlen mit flüssiger Luft gebunden, darauf das Ventil c geschlossen und der Autoklav A mit flüssiger Luft gekühlt. Nach Wegnahme der Kühlung bei B zeigten die Hochdruckmanometer C, D und E einen langsamen Druckanstieg an. Eine weitere durch Abheitzen des Autoklaven B bewirkte Drucksteigerung führte eine Verflüssigung des Gases im Autoklaven A herbei. Nach dem Schließen von Ventil b konnten so bei der Wiedererwärmung von A Drucke bis weit über 200 Kg/cm² erhalten werden. Die Manometer D und E wurden nach Erreichen des für sie bestimmten Meßbereiches mittels der Ventile d und e gegen den Meßautoklaven abgeschlossen; ebenso wurde bei der späteren Desorption das Manometer C

gegen D und E und für den Meßbereich von Manometer E die andren gegen dieses abgeschlossen. Die Ein- und Abschaltung der Manometer erfolgte beim Adsorptionsversuch wie auch bei dem ausgeführten Blindversuch selbstverständlich bei ein und derselben Druckeinstellung. Die Zuleitung vom Autoklav A zu den einzelnen Manometern wurden so gestaltet, daß das Volumen von Autoklav plus einem der Manometer C, D oder E stets das gleiche war, nämlich 25,46 cm^3 bei 18° C. Darin sind also enthalten das schädliche Volumen des Autoklaven A, das der Zuleitung zum dreifachen T-Stück und das Volumen plus Zuleitung der Röhrenfeder des jeweiligen Manometers. Dieses Volumen von 25,46 cm^3 wurde mit Hilfe des Teils II. der Meßseite durch Abpumpen bestimmt.

Zur Aufnahme der drei Argonisothermen 100° C, 150° C und 200° C wurde die Hochdruckseite wegen des großen schädlichen Volumens im Verhältnis zur adsorbierten Gasmenge etwas verändert. Bei ihnen wurde der Druck nur mit dem Manometer C gemessen, das zu diesem Zweck nur mit einer kurzen Zuleitung an dem einfachen T-Stück h angeschlossen wurde. Hier wurde das schädliche Volumen zu 7,36 cm^3 bestimmt. Mit dieser Veränderung der Hochdruckseite war auch eine räumliche Veränderung der Meßseite bedingt. Das Volumen der Verbindungsleitungen betrug nach der Veränderung 94,4 cm^3 bei 18° C, so daß nun das Gesamtvolumen des Teiles I. der Meßseite 1858,4 cm^3 betrug.

War auf diese Weise der gewünschte Anfangsdruck erreicht, so wurde nach eingetretener Druckkonstanz die erste Desorption durch Öffnen des Ventils a zur Meßseite hin vorgenommen, derart daß der Druck am Manometer um 10 oder 15 Kg/cm^2 sank. Die Zeit für diese Desorption betrug stets 20 Minuten. Nach dem Schließen von a wurde Druckkonstanz am Manometer und Temperaturausgleich im Meßvolumen abgewartet, um dann abzulesen. Nach einer Viertelstunde erfolgte dann eine Kontrollablesung.

Zeigte das Hochdruckmanometer E schließlich noch einen Druck von etwa 1 Kg/cm^2 an, so wurde dieses abgeschaltet und dafür das Quecksilbermanometer F eingeschaltet; um auch hier das Volumen konstant zu halten, wurde der Quecksilbermeniskus des einen Schenkels mit Hilfe des Niveaugefäßes Q stets auf ein und dieselbe Einstellmarke E_2 gebracht. Die Ein- und Abschaltung von Manometer F erfolgte auch hier bei Adsorptions- und Blindversuch bei ein und derselben Druckeinstellung.

Zur Messung der unter 1 Kg/cm^2 im Autoklaven A enthaltenen Gasmenge diente der Teil II. der Meßseite. Das Gas wurde dabei mit Hilfe der Quecksilberpumpe K in die Töplerpumpe L gepumpt und von hier aus in die Meßbürette I gedrückt. Bei den Isothermen unterhalb 0° C wurden noch Isothermenpunkte bei ver-

schiedenen Drucken aufgenommen, um einen Anschluß an die Messungen von H. A. Propfe [10]) zu erhalten. Die Druckablesung erfolgte wie oben beschrieben mittels Manometer F. Bei den Isothermen oberhalb 0° C wurde auf die Messung weiterer Punkte unterhalb 760 mm Hg verzichtet, da hier die adsorbierte Gasmenge zu klein im Verhältnis zur im Gasraum vorhandenen ist. Die noch restlich im Autoklaven vorhandene Gasmenge wurde unter Erhitzen auf 280° C durch Abpumpen bestimmt.

Die Zeit für die Aufnahme eines Blindversuches, bzw. Adsorptionsversuches erstreckte sich insgesamt über etwa sechs bis sieben Stunden.

Um die aus dem schädlichen Volumen stammende Gasmenge festzustellen, war es nötig, unter denselben Bedingungen die Blindisothermen aufzunehmen, da in dem untersuchten Temperatur- und Druckintervall die idealen Gasgesetze keine Gültigkeit haben. Vor der Ausführung dieser Versuche wurde der Meßautoklav aufgeschraubt, die aktive Kohle entfernt und durch ein Messingfüllstück gleichen Volumens ersetzt. Das spez. Gewicht der aktiven Kohle ($A.K.T._{II}$ der I. G. Farbenindustrie) wurde mit wasserfreiem Benzol zu 1,61, mit dest. Wasser zu 1,62 und mit Quecksilber zu 1.60 im Pyknometer bestimmt. Hiernach wurde die Hochdruckseite wieder evakuiert. Da das Vorratsgefäß M abnehmbar und ein anderes mit einem anderen Adsorptiv angesetzt werden konnte, war diese Manipulation nur einmal notwendig, sodaß alle Isothermen an ein und derselben Kohle aufgenommen werden konnten.

Auswertung der Versuchsergebnisse.

Da sämtliche Isothermen mit Hilfe der Desorptionsmethode aufgenommen wurden, entsprechen die nach der jeweiligen Desorption im Meßvolumen, bzw. in der Meßbürette vorhandenen Gasmengen nicht direkt der im Autoklav vorhandenen; diese setzt sich vielmehr additiv zusammen aus den in den verschiedenen Desorptionsintervallen abgelassenen Gasmengen, so daß sich die im Autoklav bei einem gewissen Druck vorhanden gewesene Gasmenge einfach aus einer Addition der in den späteren Desorptionsintervallen freigewordenen Gasmenge ergibt.

Ist nun V_g das Volumen des Meßkolbens, V_k das Volumen der Verbindungsleitungen dieses Meßteiles, V_G das Gesamtvolumen, t_g die Thermostatentemperatur, t_k die Zimmertemperatur, p_n der Manometerstand in mm Hg bei 0° C, so gilt für die im Meßteil I. vorhandene Gasmenge unter Normalbedingungen:

---

[10]) H. A. Propfe: „Adsorptionsversuche mit Edelgasen". Dissertation Bonn 1932.

$$V_o = \frac{V_g \cdot 273{,}2}{T_g} \cdot \frac{p_n}{760} + \frac{V_k \cdot 273{,}2}{T_k} \cdot \frac{p_n}{760} \cdot$$

Setzt man $V_g = V_G - V_k$ und $V_k = a \cdot V_G$, so wird

$$V_o = \frac{(V_G - a \cdot V_G) \cdot 273{,}2}{T_g} \cdot \frac{p_n}{760} + \frac{a \cdot V_G}{T_k} \cdot \frac{p_n}{760}$$

oder

$$V_o = \frac{p_n}{760} \cdot \left[\frac{(1 - a) \cdot 273{,}2}{T_g} + \frac{a \cdot 273{,}2}{T_k} \right] \cdot V_G$$

Eine einfache Umformung ergibt:

$$V_o = \frac{p_n}{760} \cdot \frac{V_G}{T_G} \cdot f,$$

wo $$f = (1 - a) + a \cdot \frac{T_G}{T_k} \text{ ist.}$$

f ergibt für den Fall der im Maximum beobachteten Temperaturdifferenz $t_g - t_k = 3^0$ C den Wert f = 0,999; demnach kann für die Berechnung der im Meßteil I. enthaltenen Gasmenge die Formel

$$V_o = \frac{V_G \cdot 273{,}2}{T_g} \cdot \frac{p_n}{760} \qquad (1)$$

angesetzt werden.

Für die Berechnung der in der Meßbürette enthaltenen Gasmenge gilt sinngemäß dieselbe Formel, also wenn v das abgelesene Volumen, p_m der Druck bei 0^0 C und t_b die Temperatur des sie umgebenden Wassermantels ist, so errechnet sich die enthaltene Gasmenge aus der Formel:

$$v_o = \frac{v \cdot 273{,}2}{T_b} \cdot \frac{p_m}{760} \cdot$$

Da bei einem Anfangsdruck von 200 Kg/cm² im Meßautoklav A 5 l und mehr Gas vorhanden sind, wurde der Meßkolben innerhalb einer Versuchsreihe mehrfach in den Rückgewinnungskolben entleert; das geschah mit Hilfe der Adsorptionskohle R, die an dem Rückgewinnungskolben angebracht war. Durch Kühlen mit flüssiger Luft konnte der Meßkolben so wieder bis zur Entladungsfreiheit entleert werden.

Die folgenden Tabellen bringen die bei den Versuchen gefundenen Daten. Es bedeuten darin:

P_1 der abgelesene Druck am Manometer des Meßautoklaven, wenn nicht anders vermerkt, in Kg/cm² für den Adsorptionsversuch,

P_2 der abgelesene Druck für den Blindversuch,
p_1 der am Hg-Manometer des Teils I. der Meßseite abgelesene Druck in mm Hg bei 0° für den Adsorptionsversuch,
p_2 der entsprechende Druck beim Blindversuch,
v_{11} das Volumen in der Meßbürette des Teiles II. beim Adsorptionsversuch,
v_{22} das entsprechende Volumen beim Blindversuch,
p_{11} bzw.
p_{22} der zu diesen Volumina gehörigen Drucke in mm Hg bei 0° C für den Adsorptions- bzw. Blindversuch,
W_1 die mit Hilfe der Formel (1) berechneten im Meßkolben V bzw. in der Meßbürette I nach der Desorption enthaltenen Gasmenge bei 0° und 760 mm Hg beim Adsorptionsversuch und
W_2 die entsprechenden Daten des Blindversuches.

—104,0° C Stickstoffisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 18,0° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 17,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
150,0	0,0	0,0	150,0	0,0	0,0
130,0	348,7	821,8	130,0	354,8	835,1
110,0	667,5	1573,2	110,0	683,6	1609,1
90,0	357,4	842,3	90,0	363,4	855,5
70,0	733,1	1727,7	70,0	744,2	1751,7
50,0	411,3	969,3	50,0	415,3	927,6
30,0	785,9	1852,2	30,0	793,0	1866,7
13,0	337,2	794,8	13,0	327,9	771,9
3,7	558,5	1316,3	3,7	526,1	1238,3
0,0	670,8	1580,9	0,0	600,5	1413,5

—37,5° C Stickstoffisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 19,2° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 18,0° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
150,0	0,0	0,0	150,0	0,0	0,0
130,0	204,5	480,0	130,0	207,4	488,9
110,0	532,1	1248,8	110,0	535,8	1262,9
90,0	345,6	811,2	90,0	345,7	814,7
70,0	562,8	1321,0	70,0	561,7	1323,9
50,0	269,0	631,4	50,0	265,3	625,3
30,0	596,2	1399,2	30,0	586,8	1383,0
14,0	315,4	740,2	14,0	303,3	714,9
4,2	483,7	1135,2	4,2	458,8	1081,3
0,0	551,2	1293,6	0,0	510,7	1203,7

0° C Stickstoffisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 20,1° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 21,4° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
180,0	0,0	0,0	180,0	0,0	0,0
160,0	104,4	243,5	160,0	104,9	244,4
140,0	304,9	711,0	140,0	305,9	712,9
120,0	558,3	1301,7	120,0	515,7	1201,7
100,0	218,8	510,2	100,0	734,3	1710,9
80,0	442,0	1030,5	80,0	218,5	509,2
60,0	668,8	1559,4	60,0	443,2	1032,6
40,0	227,3	530,0	40,0	667,0	1554,1
20,0	465,4	1085,1	20,0	222,0	517,3
10,0	585,7	1365,7	10,0	333,9	778,0
0,0	704,0	1650,2	0,0	443,2	1032,6

200° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 20,4° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 25,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
197,0	0,0	0,0	199,2	0,0	0,0
179,3	45,4	102,5	189,4	24,5	53,3
159,7	93,6	211,0	169,7	74,8	162,5
140,0	142,0	320,3	150,1	123,4	269,1
119,0	192,8	437,1	110,0	223,5	485,6
98,2	244,7	553,3	89,8	273,5	549,1
78,6	259,3	666,1	69,9	322,3	700,2
59,2	343,9	775,7	50,2	370,3	804,4
39,6	393,4	887,4	30,0	419,3	910,7
19,8	443,9	1001,2	20,1	431,9	955,5
0,0	50,6	114,2	10,1	454,4	1005,3
			0,0	22,5	48,9

(Volumen des Meßautoklaven gleich 7,36 cm^3).

200° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 20,0° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 19,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
193,0	0,0	0,0	194,6	0,0	0,0
190,0	23,0	53,7	190,0	33,5	78,7
150,0	347,5	809,3	150,0	353,6	829,2
110,0	664,3	1552,3	110,0	667,5	1564,2
90,0	159,9	374,9	90,0	156,8	367,8
70,0	321,8	751,0	70,0	313,7	735,1
50,0	477,2	1118,5	50,0	467,0	1094,0
30,0	164,1	387,0	30,0	624,9	1464,9
20,0	240,6	563,3	20,0	69,6	163,2
10,0	317,3	741,0	10,0	142,8	334,4
0,0	391,0	915,0	0,0	213,5	500,2

(Volumen des Meßautoklaven gleich 25,46 cm^3).

150° Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 20,2° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 24,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
185,4	4,6	10,4	197,5	0,0	0,0
166,1	56,1	127,2	180,2	48,1	102,9
148,5	103,1	233,9	159,4	103,6	226,5
131,3	149,2	338,2	138,8	152,2	348,7
114,5	194,2	440,3	119,9	210,5	460,5
95,5	245,5	556,4	100,2	263,6	576,5
77,7	293,6	665,5	80,8	315,2	689,4
60,8	339,4	769,4	60,9	367,5	803,8
45,1	382,2	866,3	34,5	435,6	952,7
23,4	441,8	1001,4	22,0	466,5	1020,3
0,0	64,9	147,1	10,7	493,9	1080,4
			0,0	25,0	54,8

(Volumen des Meßautoklaven gleich 7,36 cm^3).

100° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 20,6° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 25,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
199,2	0,0	0,0	198,9	0,0	0,0
180,3	53,5	120,6	183,6	44,4	96,4
159,7	106,9	252,8	168,1	89,4	194,1
140,3	167,7	377,8	151,7	137,4	298,5
120,0	226,0	509,4	131,2	197,2	428,5
101,5	282,6	636,9	105,3	272,5	591,5
83,0	336,8	759,1	90,4	315,2	684,6
61,9	399,0	899,4	70,5	371,9	807,8
42,1	457,9	1032,0	47,6	435,2	945,4
20,1	525,9	1180,9	22,3	502,7	1093,2
0,0	61,6	137,1	12,0	530,5	1152,5
			0,0	30,4	66,1

(Volumen des Meßautoklaven gleich 7,36 cm³).

100° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 19,7° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 19,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
194,2	0,0	0,0	194,0	0,0	0,0
190,0	26,4	62,0	190,0	33,6	83,7
150,0	391,4	919,4	150,0	402,0	943,3
110,0	377,5	885,7	110,0	370,5	869,6
90,0	564,5	1323,3	90,0	554,5	1298,7
70,0	192,2	450,5	70,0	187,1	438,2
50,0	371,3	870,2	50,0	359,1	841,6
30,0	555,0	1302,4	30,0	536,0	1259,3
20,0	98,9	232,0	20,0	93,6	219,8
10,0	167,2	414,2	10,0	167,9	393,9
0,0	262,5	616,0	0,0	248,6	583,9

(Volumen des Meßautoklaven gleich 25,46 cm³).

50° C Argonisotherme.

Temperatur der Meßvolumens bei A: 21,1° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 23,8° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
198,6	0,0	—	—	0,0
190,0	79,5	—	—	188,9
175,0	224,9	—	—	534,1
165,0	327,0	—	—	777,1
150,4	481,4	—	—	1143,8
135,2	164,5	—	—	390,8
120,0	344,1	—	—	817,7
110,0	445,3	—	—	1058,2
100,0	557,3	—	—	1324,1
90,0	668,1	—	—	1587,4
75,0	162,6	—	—	386,3
60,0	330,7	—	—	785,5
45,0	495,5	—	—	1177,2
30,0	657,6	—	—	1562,1
15,0	162,3	—	—	385,8
0,5	323,3	—	—	768,2
0,00	—	32,5	633,9	24,92
		2,8	515,1	1,74

Temperatur des Meßvolumens bei B: 16,8° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 19,9° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
191,0	0,0	—	—	0,0
190,0	9,8	—	—	23,2
175,3	162,6	—	—	384,9
165,3	99,9	—	—	236,5
150,5	256,3	—	—	606,7
135,3	417,4	—	—	988,0
120,0	579,9	—	—	1372,8
110,0	691,0	—	—	1635,6
100,0	106,9	—	—	253,1
90,0	211,8	—	—	501,4
75,0	370,4	—	—	876,8
60,0	527,5	—	—	1248,6
45,0	683,0	—	—	1616,7
30,0	150,8	—	—	356,9
15,0	301,1	—	—	712,7
1,3	440,2	—	—	1044,2
0,00	—	40,2	677,6	33,38
		13,1	567,1	9,11
		9,0	559,2	6,17

0° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 19,6° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 23,2° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
192,0	0,0	—	—	0,0
190,0	19,0	—	—	44,5
163,0	283,2	—	—	663,7
150,0	143,4	—	—	336,0
135,1	315,8	—	—	739,9
120,0	493,3	—	—	1155,0
105,2	669,5	—	—	1568,6
95,0	114,1	—	—	267,3
85,0	230,1	—	—	539,1
75,0	343,7	—	—	805,2
60,0	518,1	—	—	1213,8
45,0	687,3	—	—	1610,2
30,0	165,0	—	—	386,2
15,0	335,1	—	—	784,9
1,0	500,7	—	—	1172,1
653,2 mm	—	29,3	630,8	22,47
		9,6	565,3	6,59
		0,3	481,6	0,17
300,2 mm	—	26,6	597,6	19,32
		1,2	474,5	0,69
0,0 mm	—	23,8	610,1	17,65
		1,6	475,0	0,92

Temperatur des Meßvolumens bei B: 20,1° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 23,5° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
191,5	0,0	—	—	0,0
190,0	16,2	—	—	38,0
174,9	179,5	—	—	420,0
163,0	119,0	—	—	278,4
150,0	253,1	—	—	592,2
133,3	429,3	—	—	1004,5
120,0	571,9	—	—	1338,2
105,2	733,4	—	—	1715,4
95,0	102,7	—	—	240,3
85,0	210,7	—	—	493,0
75,0	318,7	—	—	754,7
65,0	481,7	—	—	1027,1
43,1	677,4	—	—	1585,1
15,8	292,1	—	—	695,2
2,6	439,0	—	—	1027,2
0,6	—	41,8	676,2	34,36
		15,5	572,0	10,77
		1,8	523,7	1,12
0,00	—	29,5	627,6	22,51
		4,0	567,6	2,53

0° C Argonisotherme.

(Der Druck im Meßautoklaven wurde bei dieser Versuchsreihe nur mit Manometer C gemessen.)

Temperatur des Meßvolumens bei A: 20,0° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 20,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
190,5	0,0	0,0	191,0	0,0	0,0
190,0	4,7	11,1	190,0	9,0	21,1
163,0	251,0	586,8	163,0	265,6	619,4
150,0	402,3	940,3	150,0	414,9	967,0
135,0	614,3	1438,3	135,0	611,9	1426,0
120,0	130,1	304,1	120,0	114,7	267,6
105,0	294,0	687,5	105,0	264,2	615,1
95,0	436,0	1020,2	95,0	396,4	924,9
85,0	531,1	1243,1	85,0	482,5	1124,6
75,0	646,0	1511,6	75,0	594,0	1382,2
65,0	123,3	288,8	65,0	126,5	294,6
45,0	351,8	822,6	45,0	346,6	807,9
30,0	522,0	1220,7	30,0	508,1	1185,0
15,0	690,1	1613,4	15,0	631,0	1470,8
0,0	194,2	454,7	0,0	166,0	387,2

0° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 24,5° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 20,0° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
193,7	0,0	0,0	191,1	0,0	0,0
190,0	36,4	84,1	190,0	10,8	25,3
163,0	312,6	721,9	163,0	291,4	681,8
150,0	450,0	1039,8	150,0	427,5	1000,0
135,0	696,1	1609,4	135,0	652,5	1527,1
120,0	102,5	236,6	120,0	85,7	200,6
105,0	286,7	661,9	105,0	252,6	590,6
95,0	405,9	938,2	95,0	359,8	840,5
85,0	522,6	1207,5	85,0	465,6	1089,9
75,0	635,3	1468,1	75,0	572,0	1339,7
65,0	119,7	276,1	65,0	120,9	282,7
45,0	350,1	809,2	45,0	339,0	792,5
30,0	512,6	1183,6	30,0	490,7	1148,5
15,0	178,8	413,0	15,0	173,4	405,4
1,0	345,8	799,5	1,1	316,5	742,4
0,0	29,4	68,0	0,0	21,4	50,1

—60,0° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 18,4° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 22,0° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
190,3	0,0	—	—	0,0
190,0	2,0	—	—	4,9
167,2	226,2	—	—	536,2
147,0	447,4	—	—	1060,5
130,3	204,9	—	—	485,9
110,0	447,2	—	—	1060,0
100,0	568,7	—	—	1348,8
	8,2	—	—	19,4
90,0	128,7	—	—	305,1
80,0	250,6	—	—	594,1
70,0	369,7	—	—	866,5
58,0	510,7	—	—	1210,7
45,0	670,2	—	—	1588,7
	11,3	—	—	26,8
30,0	189,0	—	—	448,1
15,0	366,1	—	—	858,0
1,0	553,0	—	—	1311,1
641,2 mm	—	24,0	608,7	17,79
		7,6	283,2	1,36
276,7 mm	—	35,6	672,2	29,18
		—0,6	466,2	—0,34
		3,0	500,2	1,83
0,0 mm	—	32,6	699,7	27,78
		3,2	339,2	1,32

Temperatur des Meßvolumens bei B: 18,6° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 20,1° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
190,0	0,0	—	—	0,0
167,2	263,7	—	—	625,4
147,0	216,1	—	—	512,2
128,3	424,7	—	—	1006,6
110,0	631,9	—	—	1497,6
90,0	222,2	—	—	522,6
80,0	335,3	—	—	794,7
70,0	447,2	—	—	1059,9
60,0	559,7	—	—	1327,1
45,1	725,1	—	—	1718,4
30,0	159,1	—	—	377,0
15,0	319,0	—	—	756,0
1,0	465,2	—	—	1102,6
639,2 mm	—	20,1	614,5	15,03
		4,2	548,7	2,81
0,0 mm	—	32,6	655,5	26,01
		10,3	560,8	7,03

—79,5° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 22,7° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 27,4° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
190,5	0,0	—	—	0,0
190,0	6,2	—	—	14,4
170,0	203,6	—	—	472,2
151,0	406,0	—	—	941,6
129,8	654,0	—	—	1516,7
115,0	191,7	—	—	441,7
100,0	407,1	—	—	944,1
90,0	524,6	—	—	1216,7
80,0	660,3	—	—	1531,4
70,0	127,8	—	—	296,3
60,0	258,8	—	—	600,1
50,0	394,5	—	—	914,9
40,0	518,8	—	—	1203,1
30,0	642,0	—	—	1488,8
20,0	121,5	—	—	282,6
10,0	249,8	—	—	579,0
0,5	391,4	—	—	907,2
411,8 mm	—	39,2	672,8	42,1
		15,3	571,0	
		0,5	503,7	
0,0 mm	—	42,1	675,1	53,8
		22,2	601,1	
		7,7	541,1	

Temperatur des Meßvolumens bei B: 20,9° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 25,0° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
193,5	0,0	—	—	0,0
190,5	40,1	—	—	93,9
170,0	279,6	—	—	653,9
151,0	507,7	—	—	1187,1
129,7	253,4	—	—	592,4
115,0	429,9	—	—	1005,1
100,0	618,7	—	—	1446,5
90,0	120,8	—	—	282,4
80,0	245,5	—	—	574,0
70,0	366,9	—	—	875,8
60,0	487,7	—	—	1140,2
50,0	607,0	—	—	1419,2
40,0	714,5	—	—	1670,6
30,0	125,8	—	—	294,2
20,0	237,9	—	—	556,2
10,0	348,3	—	—	814,5
0,5	443,2	—	—	1036,3
0,0	—	40,0	675,0	72,9
		31,2	585,8	
		25,0	682,5	

—79,5° C Argonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 22,8° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 24,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
191,2	0,0	0,0	196,7	0,0	0,0
190,0	12,9	29,8	190,0	87,5	201,6
170,0	235,8	545,3	170,0	353,9	814,2
151,0	438,6	1014,8	151,0	585,0	1347,5
129,6	718,2	1662,3	129,6	266,3	612,9
115,0	170,5	394,6	115,0	433,1	996,2
100,0	385,7	892,3	100,0	627,9	1447,1
90,0	524,3	1210,7	90,0	122,8	282,4
80,0	649,5	1501,7	80,0	240,4	553,4
70,0	136,2	315,1	70,0	371,7	856,2
60,0	257,6	595,1	60,0	485,1	1117,3
50,0	402,7	932,4	50,0	615,7	1418,8
40,0	540,0	1249,7	40,0	121,8	280,2
30,0	650,9	1507,5	30,0	237,0	542,9
20,0	115,6	267,8	20,0	345,2	794,4
10,0	250,0	578,5	10,0	463,9	1065,9
0,5	394,7	912,4	0,5	562,4	1292,3
0,0	39,0	90,1	0,0	16,1	37,1

50° C Kryptonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 18,9° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 18,8° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
155,0	0,0	—	—	0,0
150,0	67,7	—	—	159,2
140,0	203,9	—	—	479,5
130,0	340,0	—	—	799,5
120,0	135,9	—	—	319,6
110,0	274,5	—	—	645,5
100,0	405,6	—	—	953,6
90,0	511,5	—	—	1202,6
80,0	153,1	—	—	360,1
70,0	301,3	—	—	708,5
60,0	432,1	—	—	1016,0
50,0	563,7	—	—	1325,4
40,0	689,2	—	—	1620,4
30,0	119,7	—	—	281,2
20,0	240,1	—	—	564,0
10,0	359,4	—	—	843,1
1,0	471,1	—	—	1106,5
0,0 mm	—	36,6	666,8	30,0
		22,8	610,4	17,1
		1,4	541,7	0,9

Temperatur des Meßvolumens bei B: 18,0° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 20,8° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
152,5	0,0	—	—	0,0
150,0	36,8	—	—	86,7
140,0	185,8	—	—	428,0
130,0	316,7	—	—	746,5
120,0	452,0	—	—	1067,4
110,0	133,4	—	—	314,5
100,0	260,0	—	—	613,0
88,8	401,9	—	—	947,5
80,0	110,9	—	—	261,6
70,0	232,3	—	—	547,7
60,0	350,5	—	—	816,2
50,0	473,1	—	—	1115,2
40,0	587,5	—	—	1384,7
30,0	697,1	—	—	1643,2
20,0	106,6	—	—	251,4
10,0	209,7	—	—	494,5
1,0	299,5	—	—	706,1
0,0 mm	—	35,9	661,2	29,0
		10,0	556,0	6,8

28° C Kryptonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 24,5° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 23,0° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
154,5	0,0	—	—	0,0
150,0	61,6	—	—	142,1
140,0	203,2	—	—	468,6
130,0	343,4	—	—	791,9
120,0	488,5	—	—	1126,2
110,0	631,3	—	—	1455,2
100,0	140,9	—	—	324,8
89,9	282,4	—	—	651,0
80,0	114,4	—	—	325,8
70,0	282,7	—	—	651,5
60,0	424,5	—	—	978,4
50,0	558,3	—	—	1286,8
37,4	720,0	—	—	1659,6
30,0	92,2	—	—	212,5
19,0	220,9	—	—	519,3
10,0	335,0	—	—	772,2
1,0	450,2	—	—	1037,7
0,0 mm	—	43,8	697,7	37,5
		28,7	634,5	22,4
		1,1	579,3	0,8

Temperatur des Meßvolumens bei B: 18,8° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 19,0° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
148,7	0,0	—	—	0,0
140,0	128,1	—	—	299,9
130,0	271,5	—	—	635,8
120,0	409,3	—	—	958,3
110,0	135,8	—	—	317,9
100,0	265,5	—	—	621,8
87,8	427,3	—	—	1004,3
80,0	93,6	—	—	220,0
70,0	219,1	—	—	515,0
60,0	343,9	—	—	808,2
50,0	462,6	—	—	1087,1
40,0	529,4	—	—	1361,6
30,0	691,4	—	—	1624,8
20,0	105,6	—	—	248,2
10,0	211,7	—	—	497,5
1,1	303,4	—	—	713,0
0,0 mm	—	36,4	663,8	32,3
		9,2	541,6	6,7

28° C Kryptonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 24,2° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 26,0° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
150,1	0,0	0,0	148,0	0,0	0,0
140,0	144,1	332,1	140,0	112,9	258,5
130,0	285,1	657,4	130,0	258,2	591,9
120,0	429,2	990,3	120,0	400,8	917,5
110,0	571,3	1318,9	110,0	539,0	1235,0
100,0	140,8	324,8	100,0	670,8	1538,9
90,0	287,2	663,3	90,0	138,5	317,5
80,0	424,2	977,4	80,0	263,2	603,1
70,0	539,8	1246,1	70,0	367,7	842,4
60,0	166,7	384,2	60,0	520,0	1191,6
50,0	291,8	673,2	50,0	631,6	1448,8
40,0	420,9	970,9	40,0	119,0	272,9
30,0	558,1	1289,0	30,0	248,1	568,3
20,0	122,8	283,5	20,0	375,4	860,3
10,0	241,5	556,8	10,0	482,1	1103,6
1,0	352,7	813,4	1,0	572,5	1311,8
0,0	26,3	60,7	0,0	17,0	39,0

0° C Kryptosinotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 25,1° C.
Temperatur des Meßvolumens bei B: 23,8° C.

P_1	p_1	W_1	P_2	p_2	W_2
161,4	0,0	0,0	162,7	0,0	0,0
160,0	17,5	40,3	160,0	38,8	89,6
130,0	505,8	1161,3	130,0	565,0	1303,8
120,0	679,5	1562,1	120,0	174,7	404,2
110,0	142,7	328,0	110,0	312,2	720,3
100,0	271,1	669,2	100,0	448,1	1034,0
90,0	444,8	1022,0	90,0	590,9	1363,4
80,0	599,8	1379,5	80,0	155,4	358,5
70,0	148,1	340,7	70,0	291,3	672,4
60,0	302,4	695,2	60,0	430,0	992,6
50,0	442,1	1017,6	50,0	553,1	1276,3
40,0	563,1	1293,0	40,0	111,0	256,0
30,0	140,8	323,9	30,0	242,9	560,3
20,0	268,6	617,0	20,0	354,0	816,9
10,0	395,2	908,9	10,0	459,6	1060,7
1,0	508,2	1169,9	1,0	555,9	1282,8
0,0	30,0	69,0	0,0	16,7	38,5

0° C Kryptosinotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 22,1° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 23,4° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
160,5	0,0	—	—	0,0
160,0	8,5	—	—	19,8
130,0	470,9	—	—	1094,5
120,0	110,3	—	—	356,4
110,0	325,2	—	—	755,7
100,0	475,9	—	—	1106,1
90,0	627,6	—	—	1458,5
87,9	657,6	—	—	1528,3
80,0	117,1	—	—	272,1
70,0	267,3	—	—	621,2
60,0	411,5	—	—	956,3
50,0	550,5	—	—	1279,4
40,0	681,5	—	—	1582,8
30,0	125,9	—	—	292,6
20,0	251,5	—	—	585,0
10,0	376,3	—	—	874,5
1,0	498,5	—	—	1158,5
0,0 mm	—	45,8	706,2	39,1
		30,6	638,1	23,6
		9,3	548,0	6,4

Temperatur des Meßvolumens bei B: 18,5° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 19,0° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
163,4	0,0	—	—	0,0
160,0	57,8	—	—	136,1
130,0	534,9	—	—	1258,9
120,0	172,0	—	—	404,8
110,0	317,6	—	—	747,4
100,0	458,2	—	—	1078,1
90,0	597,6	—	—	1406,7
82,0	717,9	—	—	1689,0
80,0	21,2	—	—	44,9
70,0	134,8	—	—	364,3
60,0	283,5	—	—	666,8
50,0	408,3	—	—	960,4
40,0	526,0	—	—	1238,4
30,0	642,5	—	—	1511,4
20,0	106,8	—	—	251,2
10,0	214,2	—	—	503,4
1,0	307,2	—	—	722,5
0,0 mm	—	35,4	660,7	28,9
		13,9	560,5	9,6
		0,5	544,4	0,3

—41,5° C Kryptonisotherme.

Temperatur des Meßvolumens bei A: 17,4° C.
Temperatur der Meßbürette bei A: 18,4° C.

P_1	p_1	v_{11}	p_{11}	W_1
161,1	0,0	—	—	0,0
160,0	14,6	—	—	34,6
140,0	335,8	—	—	793,3
130,0	487,2	—	—	1150,7
120,0	154,9	—	—	366,0
110,0	307,2	—	—	725,6
100,0	460,0	—	—	1086,7
90,0	611,6	—	—	1444,6
80,0	753,7	—	—	1780,2
70,0	149,7	—	—	353,7
60,0	300,6	—	—	710,1
50,0	440,0	—	—	1039,8
40,0	585,0	—	—	1382,0
30,0	127,7	—	—	301,6
20,0	255,8	—	—	604,2
10,0	383,9	—	—	906,8
1,0	515,0	—	—	1216,2
0,0 mm	—	46,6	705,3	40,4
		45,4	696,6	38,8
		19,9	592,1	12,5
		0,9	513,0	0,6

Temperatur des Meßvolumens bei B: 18,4° C.
Temperatur der Meßbürette bei B: 20,0° C.

P_2	p_2	v_{22}	p_{22}	W_2
164,0	0,0	—	—	0,0
160,0	113,2	—	—	266,1
140,0	471,7	—	—	1109,1
130,0	634,8	—	—	1492,6
120,0	160,4	—	—	377,2
110,0	329,8	—	—	775,4
100,0	454,1	—	—	1067,6
90,0	594,7	—	—	1398,2
87,4	611,5	—	—	1487,6
80,0	101,7	—	—	239,2
70,0	239,1	—	—	562,7
60,0	372,5	—	—	875,8
50,0	498,9	—	—	1172,0
40,0	611,2	—	—	1437,0
30,0	723,6	—	—	1711,3
23,3	75,7	—	—	178,1
20,0	112,4	—	—	264,4
10,0	220,1	—	—	517,6
1,0	310,8	—	—	730,7
0,0 mm	—	37,4	660,7	30,3
		22,6	546,5	15,2
		8,1	672,1	6,7

Aus diesen rein experimentellen Daten ergibt sich durch eine einfache Umrechnung — wie oben angedeutet — die wirklich im Meßautoklaven bei dem angegebenen Druck enthaltene Gasmenge. Sie errechnet sich durch Addition der jeweils in den einzelnen Desorptionsintervallen freigewordenen Gasmenge.

Seien

$$a_1', a_2', a_3', \ldots\ldots \quad \text{bzw.}$$
$$a_1'', a_2'', a_3'', \ldots\ldots$$

die unter W_1 bzw. W_2 im Meßkolben V oder in der Meßbürette I gemessenen Gasmengen, so sind

$$\begin{aligned} b_1' &= a_2' - a_1', \\ b_2' &= a_3' - a_2', \\ b_3' &= a_4' - a_3', \\ &\vdots \end{aligned} \qquad \text{bzw.} \qquad \begin{aligned} b_1'' &= a_2'' - a_1'', \\ b_2'' &= a_3'' - a_2'', \\ b_3'' &= a_4'' - a_3'', \\ &\vdots \end{aligned}$$

die in den Desorptionsintervallen jeweils freigewordenen Gasmengen. Die bei dem Druck P_m im Autoklaven enthaltenen Gasmengen sind dann:

$$c_1' = b_1',$$
$$c_2' = b_1' + b_2',$$
$$c_3' = b_1' + b_2' + b_3',$$
$$\vdots$$

bzw.

$$c_1'' = b_1'',$$
$$c_2'' = b_1'' + b_2'',$$
$$c_3'' = b_1'' + b_2'' + b_3'',$$
$$\vdots$$

In den folgenden Tabellen sind unter W die Größen c_n' für die Adsorptionsversuche eingetragen. Aus den Größen c_n'' wurde durch Multiplikation mit dem Litergewicht des betreffenden Gases und durch Division mit dem Volumen des Meßautoklaven (25,46 cm³ bzw. 7,36 cm³) die bei dem betreffenden Druck in der Gasphase herrschende Dichte berechnet. Diese Werte der Dichte befinden sich unter d. Sie wurden indessen noch graphisch in einem P-d-Diagramm korrigiert. Diese Korrektion erwies sich als notwendig, da die bei der angewendeten Methode der Desorption etwa auftretenden Fehler — hervorgerufen durch Temperaturschwankungen bei der Desorption und der damit verbundenen Störung des Gleichgewichtszustandes — auch auf die nachfolgenden desorbierten Gasmengen einwirken.

Rechnet man die unter W_1 angegebenen Werte in cm³ in Gramm um und dividiert durch die Werte der Dichte der Spalte 3, so ergeben sich die Werte $\frac{A'}{d}$ der Spalte 4.

Die Spalte 5 enthält die $\frac{A'}{d}$ -K-Werte, wo K das Apparaturvolumen 25,46 cm³ bzw. 7,36 cm³ bedeutet. Multipliziert man diese mit d, so ergibt sich sofort die adsorbierte Gasmenge in Gramm. Diese Darstellung hat den Vorzug der Einfachheit.

In Spalte 6 der folgenden Tabellen findet sich die adsorbierte Gasmenge in Gramm, und zwar direkt in Gramm pro Gramm Kohle, da alle Versuchsreihen mit ein und derselben Menge Kohle ausgeführt wurden, nämlich wie schon angegeben mit 1,000 g A. K. T.$_{II}$ der I. G. Farbenindustrie.

—104° C Stickstoffisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
150	6734,0	0,326	25,831	0,371	0,121
130	5912,2	0,285	25,941	0,481	0,137
110	5160,8	0,247	26,128	0,668	0,165
90	4318,5	0,205	26,343	0,883	0,181
70	3433,1	0,161	26,665	1,205	0,194
50	2463,8	0,113	27,265	1,805	0,204
30	1580,9	0,0694	28,486	3,026	0,210
13	786,1	0,0315	31,206	5,746	0,183
3,7	264,6	0,0086	38,483	13,023	0,112

—37,5° C Stickstoffisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
150	5262,6	0,254	25,909	0,449	0,114
130	4782,6	0,230	26,003	0,543	0,125
110	4013,8	0,192	26,142	0,682	0,131
90	3202,6	0,152	26,348	0,888	0,135
70	2692,8	0,127	26,515	1,055	0,134
50	2061,4	0,0963	26,768	1,308	0,126
30	1293,6	0,0591	27,372	1,912	0,113
14	553,4	0,0240	28,835	3,375	0,081
4,2	158,3	0,0060	32,948	7,488	0,045

0° C Stickstoffisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
180	4382,3	0,211	25,972	0,512	0,108
160	4138,8	0,199	26,008	0,548	0,109
140	3671,3	0,176	26,085	0,625	0,110
120	3180,6	0,152	26,167	0,717	0,109
100	2670,4	0,127	26,294	0,834	0,106
80	2159,1	0,102	26,470	1,010	0,103
60	1630,2	0,0763	26,718	1,258	0,0960
40	1100,2	0,0507	27,136	1,676	0,0850
20	565,1	0,0253	27,930	2,470	0,0625
10	284,5	0,0125	28,460	3,000	0,0375

200° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	1066,8	0,242	7,860	0,500	0,121
150	847,8	0,189	7,977	0,617	0,117
110	624,8	0,138	8,102	0,742	0,102
90	512,8	0,112	8,178	0,818	0,0915
70	397,1	0,0859	8,242	0,882	0,0758
50	285,5	0,0602	8,456	1,096	0,0660

150° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	1170,0	0,264	7,902	0,542	0,143
150	919,9	0,206	7,962	0,602	0,124
110	679,6	0,149	8,132	0,772	0,115
90	557,3	0,121	8,192	0,832	0,101
70	436,6	0,0937	8,309	0,949	0,0889
50	312,6	0,0656	8,497	1,137	0,0746

100° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	1277,6	0,281	8,107	0,747	0,210
150	1010,3	0,220	8,188	0,828	0,183
110	739,9	0,159	8,297	0,937	0,149
90	578,7	0,129	8,402	1,042	0,128
70	469,4	0,0985	8,497	1,137	0,112
50	336,7	0,0703	8,541	1,181	0,0831
30	205,4	0,0411	8,910	1,550	0,0637
20	135,8	0,0258	9,383	2,023	0,0522

50° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	4898,2	0,328	26,626	1,166	0,382
175	4552,7	0,304	26,702	1,242	0,377
165	4310,0	0,287	26,776	1,316	0,378
150	3935,1	0,261	26,882	1,422	0,371
135	3547,4	0,234	27,030	1,570	0,367
120	3125,6	0,206	27,053	1,593	0,328
110	2885,1	0,190	27,074	1,614	0,306
100	2619,2	0,172	27,151	1,691	0,291
90	2355,9	0,155	27,276	1,816	0,279
60	1570,4	0,102	27,451	1,991	0,203
45	1178,7	0,0765	27,472	2,012	0,154
30	793,8	0,0515	27,482	2,022	0,104
15	408,0	0,0266	27,348	1,988	0,0502
0,5	25,7	—	—	—	—

0° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	5038,5	0,335	26,897	1,437	0,480
163	4409,3	0,289	27,203	1,734	0,504
150	4089,3	0,266	27,308	1,848	0,493
120	3264,3	0,210	27,715	2,255	0,473
105	2850,7	0,184	27,642	—	—
95	2583,4	0,165	27,916	2,456	0,405
85	2311,6	0,148	27,943	2,483	0,366
75	2045,5	0,130	28,055	2,595	0,337
45	1239,5	0,0783	28,255	2,765	0,216
30	853,3	0,0534	28,491	3,031	0,162
15	454,6	0,0301	—	—	—
1	67,8	0,0018	67,620	42,160	0,0754

—60° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	5337,1	0,350	27,189	1,729	0,605
167	4805,8	0,310	27,641	2,181	0,676
147	4281,5	0,272	28,066	2,606	0,708
130	3790,0	0,238	28,393	2,933	0,698
110	3221,5	0,199	28,864	3,404	0,677
90	2647,0	0,161	29,314	3,854	0,620
80	2358,0	0,142	29,608	4,148	0,589
70	2085,6	0,125	—	—	—
45	1363,2	0,0797	30,485	5,025	0,400
30	941,9	0,0543	30,928	5,468	0,297
15	532,0	0,0298	31,831	6,371	0,190
1	78,9	0,0036	39,526	14,066	0,0501

—79,5° C Argonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
190	5586,1	0,368	27,065	1,605	0,589
170	5128,3	0,333	27,459	1,999	0,665
151	4658,9	0,298	27,875	2,415	0,720
115	3602,1	0,221	29,061	3,601	0,795
100	3119,7	0,188	29,587	4,127	0,775
90	2807,1	0,168	29,792	4,332	0,728
80	2492,4	0,147	30,231	4,771	0,701
70	2196,1	0,128	30,591	5,131	0,657
60	1892,3	0,109	30,954	5,494	0,599
30	1003,6	0,0549	32,594	7,134	0,391
20	721,0	0,0356	35,220	9,760	0,365
10	424,0	0,0199	38,571	13,111	0,261
0,5	95,8	0,0029	58,544	33,084	0,0915

50° C Kryptonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
150	4624,9	0,625	27,439	1,979	1,237
140	4304,6	0,578	27,615	2,155	1,245
130	3987,6	0,534	27,689	2,229	1,216
120	3668,0	0,487	27,928	2,468	1,201
110	3342,1	0,441	28,101	2,641	1,165
90	3034,0	0,398	28,266	2,806	1,117
80	2414,9	0,315	28,427	2,967	0,935
70	2066,5	0,268	28,592	3,132	0,839
60	1759,0	0,228	28,607	3,147	0,717
50	1449,6	0,186	28,898	3,438	0,639
40	1154,6	0,147	29,124	3,664	0,538
30	873,4	0,110	29,447	3,982	0,438
1	48,1	0,0052	34,233	8,773	0,046

28° C Kryptonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
140	4395,5	0,588	27,118	2,258	1,323
130	3737,9	0,539	28,171	2,611	1,285
110	3084,1	0,446	28,447	2,987	1,201
80	2432,1	0,314	28,720	3,260	1,024
70	2106,4	0,271	28,821	3,361	0,911
60	1779,5	0,227	29,061	3,608	0,819
50	1471,1	0,187	29,170	3,710	0,694
30	885,8	0,109	30,133	4,637	0,509
10	326,1	0,0371	32,592	7,132	0,265

0° C Kryptonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
160	5373,2	0,735	27,107	1,647	1,211
130	4298,5	0,570	27,963	2,503	1,426
120	3942,1	0,518	28,219	2,759	1,429
110	3582,8	0,468	28,387	2,927	1,370
100	3232,4	0,420	28,537	3,097	1,301
90	2880,1	0,370	28,863	3,403	1,259
80	2538,2	0,324	29,048	3,588	1,163
70	2189,2	0,278	29,198	3,738	1,039
60	1854,0	0,234	29,379	3,919	0,917
50	1530,9	0,191	29,720	4,260	0,814
40	1227,5	0,151	30,143	4,783	0,722
30	934,9	0,113	30,677	5,217	0,589
20	642,5	0,0742	32,108	6,648	0,483
10	353,0	0,0375	34,905	9,445	0,354
1	69,0	0,0056	45,620	20,160	0,113

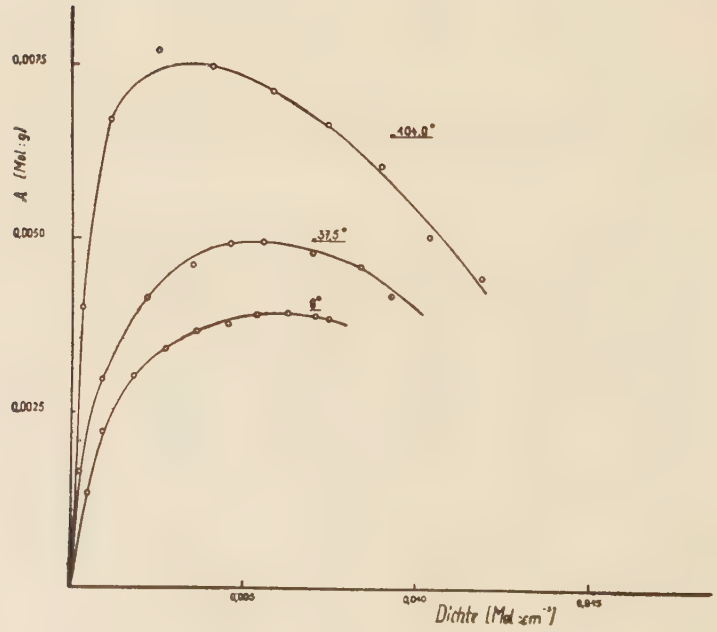

Fig. 2.

—41,5° C Kryptonisotherme.

P	W_1	d	$\frac{A'}{d}$	$\frac{A'}{d} - K$	A
160	5526,8	0,763	26,930	1,470	1,121
140	4768,1	0,637	27,755	2,295	1,462
130	4410,7	0,582	28,101	2,641	1,537
120	4044,7	0,528	28,404	2,945	1,555
110	3685,1	0,470	28,767	3,307	1,554
100	3324,0	0,424	29,076	3,616	1,533
90	2966,1	0,374	29,407	3,947	1,476
80	2630,5	0,328	29,737	4,277	1,403
70	2276,8	0,280	30,151	4,691	1,313
60	1920,4	0,223	30,430	4,970	1,158
50	1590,7	0,191	30,881	5,421	1,035
40	1308,5	0,154	31,506	6,146	0,946
30	1006,9	0,116	32,186	6,726	0,780
20	704,3	0,0780	33,481	8,021	0,626
10	401,7	0,0420	35,464	10,004	0,420
1	92,3	0,0050	62,460	37,000	0,148

In den umstehenden Darstellungen sind diese Ergebnisse noch einmal graphisch wiedergegeben und zwar in einem A-d-Diagramm, wo A, die adsorbierte Gasmenge, in Mol/Gramm Kohle und d in Mol/cm³ aufgetragen ist. Fig. 2 zeigt die Stickstoffisothermen, Fig. 3 die Argonisothermen und Fig. 4 die Kryptonisothermen.

Fig. 5 und 6 zeigen die CO_2-Isothermen bei 100° C und 50° C von A. S. Coolidge [11]) bzw. eine 20° C CH_4-Isotherme von L. Coppens [12]).

[11]) A. S. Coolidge: loc. cit.
[12]) L. Coppens: loc. cit.

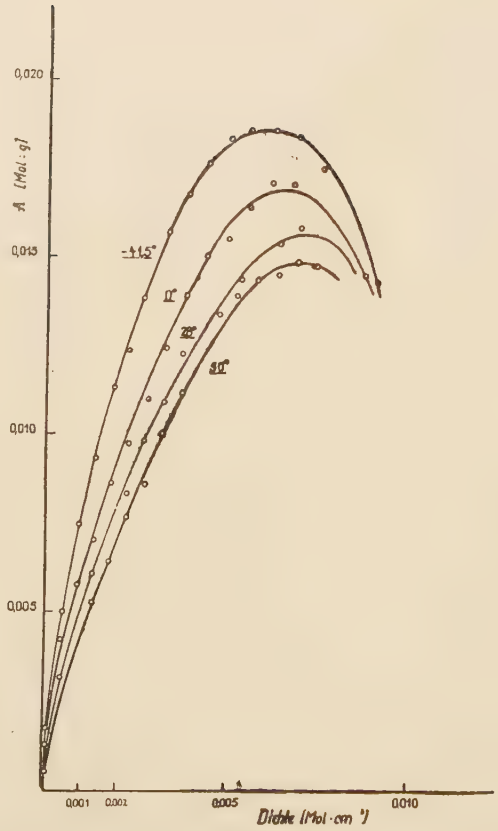
0,020
0,015
0,010
0,005
A [Mol·g]
-41,5°
11°
25°
50°
0,001
0,002
0,005
0,010
Dichte [Mol·cm⁻³]

Fig. 4.

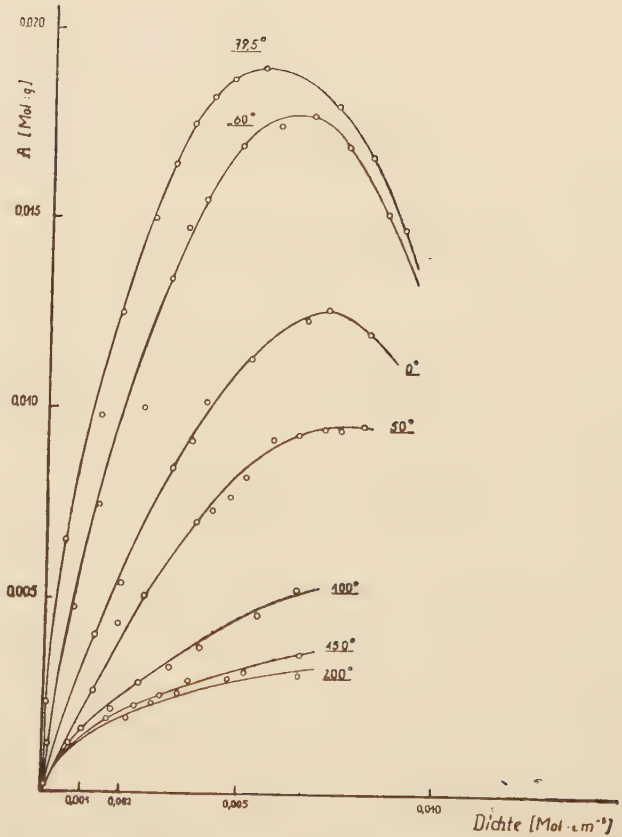
0,020
0,015
0,010
0,005
A [Mol·g]
79,5°
60°
0°
50°
100°
150°
200°
0,001
0,002
0,005
0,010
Dichte [Mol·cm⁻³]

Fig. 3.

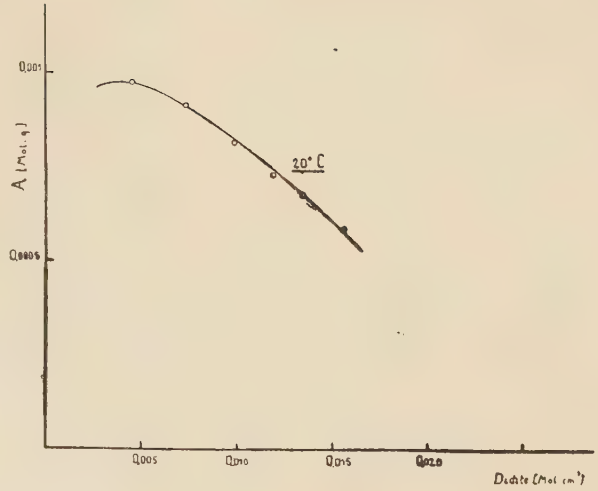

Fig. 5.

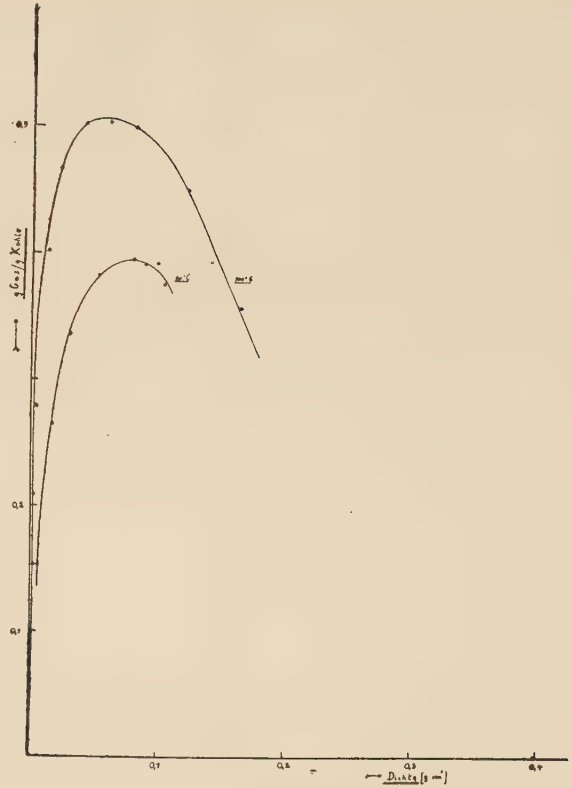

Fig. 6.

Ausbau der Theorie von Langmuir und Ableitung einer Gleichung für die Adsorptionsisothermen von kleinsten bis zu höchsten Drucken.

Die Theorie der Adsorption hat sich bisher fast nur mit der Adsorption bei kleinen Drucken beschäftigt. Durch die bisherigen Beobachtungen hat sich die Anschauung eingebürgert, daß sich die Adsorptionsisothermen der Gase nach einem linearen Anstieg bei kleinen Drucken einem konstanten Sättigungswert nähern. Dieses Verhalten gab am besten die Formel von Langmuir

$$A = \frac{a\,p}{1 + b\,p}$$

wieder, die die Eigenschaft hat, bei kleinen Drucken in die Gleichung einer Geraden überzugehen, während sie sich bei großem p dem Sättigungswert

$$A = a/b$$

nähert. (Eine Veränderlichkeit der Konstanten a und b tritt ein, falls die Oberfläche des Adsorbens in bezug auf das Adsorptionsvermögen inhomogen ist.) Dieser Sättigungswert ist experimentell nie erreicht worden. Nach Langmuir ist die Sättigung nach der Ausbildung einer monomolekularen Schicht des adsorbierten Gases erreicht. Bei sehr hohen Drucken sind die Molekeln eines Gases praktisch zu dichtester Kugelpackung zusammengedrückt und die Oberfläche ist dann mit einer monomolekularen Schicht bedeckt. Somit muß der Sättigungswert unabhängig von der Temperatur und bei verschiedenen Gasen nur von deren Molekularvolumen abhängig sein.

Hiermit stehen aber folgende Erfahrungen in Widerspruch:

1. Der durch Extrapolation gefundene Sättigungswert entspricht nur einem kleinen Teil der Oberfläche.
2. Der Sättigungswert sinkt mit steigender Temperatur.
3. Bei verschiedenen Gasen hängt der Sättigungswert von der Adsorbierbarkeit des Gases bei endlichen Drucken ab.

Unsere Untersuchungen, wie auch die von A. S. Coolidge [13]) und L. Coppens [14]), ergeben zu diesen drei Widersprüchen mit der Theorie noch einen vierten:

4. Die adsorbierte Gasmenge steigt nicht zu einem konstanten Sättigungswert an, sondern sinkt nach Erreichen eines Maximums wieder und scheint bei sehr hohen Drucken dem Wert Null zuzustreben.

---

[13]) A. S. Coolidge: loc. cit.
[14]) L. Coppens: loc. cit.

Man kann in der ungeheuren Fülle des vorliegenden Materials über die Adsorption hierzu allgemein folgendes feststellen:

Alle experimentellen Untersuchungen gehen darauf hinaus, den Überschuß an Adsorptiv zu messen, der bei Anwesenheit eines Adsorbens in einem unter einer bestimmten Dichte stehenden Gasraum sich befindet, im Vergleich mit einem sonst unter gleichen Bedingungen stehenden Gasraum ohne Adsorbens. Diskutiert werden dagegen alle Versuchsergebnisse nicht als Überschuß einer Gasmenge im Gasraum gegenüber der Menge, die bei normaler Gasdichte enthalten sein würde, sondern als Gesamtheit aller adsorbierter Molekeln oder auch Atome.

Die Adsorption kann demnach definiert werden

(a) als der stoffliche Überschuß des Adsorptivs bei Anwesenheit eines Adsorbens im Vergleich mit einem sonst unter gleicher Gasdichte stehenden abgeschlossenen Gasraum

oder

(b) als ein Vorgang, bei welchem sich eine Anzahl von Molekel oder Atome eines Adsorptivs in einem Adsorptionsraum, d. h. ein Raum von der Grundfläche der Oberfläche des Adsorbens und der Höhe einer monomolekularen Schicht, befinden.

Auf Grund dieser beiden Definitionen kann man bei genügend großen Gasdichten bei Definition (b) einen konstanten Sättigungswert erwarten, während man bei der Messung der Adsorption (Definition (a)) bei genügend hoher Gasdichte keinen oder fast keinen Überschuß findet.

Mit Hilfe dieser Definitionen läßt sich auf einfachem Wege eine Gleichung für die Adsorptionsisotherme ableiten.

Die Anziehungskräfte der einzelnen Gasmolekel untereinander seien zunächst nicht berücksichtigt. Bei sehr kleinen Drucken kann man die Gültigkeit der idealen Gasgesetze in der Gasphase wie auch im Adsorptionsraum annehmen. Ist W das Adsorptionsvolumen, so ist die Zahl der Mole des Gases im gleichen Volumen der Gasphase:

$$n = \frac{p\,W}{R\,T} = W\,d\,,$$

wenn p der Druck und d die Dichte in Mol/cm³ bedeuten. Ist die Dichte des Gases im Adsorptionsraum klein, so besteht zwischen der Dichte des Gases in diesem Adsorptionsraum und der der Gasphase ein konstantes Verteilungsverhältnis. Dieser Verteilungsfaktor sei q. Für die Menge der adsorbierten Gasmole oder die „theoretische Adsorption" (Definition (b)) erhält man so:

$$A_{th} = \frac{q\,W}{R\,T}\,p = q\,W\,d$$

Bei größeren Dichten des Gases im Adsorptionsraum muß man von diesem Wert das Eigenvolumen der Molekel des Gases $A_{th} \cdot B$ abziehen; B ist eine Konstante und kann annähernd dem Volumen eines Moles im kondensierten Zustand gleichgesetzt werden. Bei dem gleichen Verteilungsfaktor wird dann

$$A_{th} = \frac{q\,(W - A_{th}\,B)}{R\,T}\,p$$

$$A_{th} = q\,(W - A_{th}\,B)\,d$$

oder

$$(3) \qquad A_{th} = \frac{\frac{q\,W}{R\,T}\,p}{1 + \frac{q\,B}{R\,T}\,p} = \frac{q\,W\,d}{1 + q\,B\,W\,d}$$

Das ist die Langmuirsche Gleichung, worin die Konstanten einfache physikalische Bedeutung haben.

Für kleine Werte von p und auch von d geht (3) in die Gleichung einer Geraden über. Bei hohen Drucken ergibt die Gleichung den Sättigungswert

$$A_{th} = W\,d_\infty = \frac{W}{B},$$

wo d_∞ der Grenzwert der Dichte bei hohen Drucken in Mol/cm³ bedeutet, also $B = 1/d_\infty$ ist. Setzt man dagegen d_∞ selbst in Gleichung (3) ein, so ergibt sich dieser Grenzwert nicht, da d_∞ stets nur endliche Werte annehmen kann. Das Versagen der Funktion für d rührt daher, daß das Eigenvolumen der Gasmolekel in ihr noch nicht berücksichtigt ist.

Benutzen wir die Zustandsgleichung

$$p\,(W - n\,B) = n\,R\,T$$

und setzen in dieser

$$W = n/d_\infty \quad \text{und} \quad B = 1/d_\infty,$$

so wird

$$p = R\,T\,d\,\frac{d}{d_\infty - d}$$

und

$$A_{th} = \frac{q\,W\,d_\infty \dfrac{d}{d_\infty - d}}{1 + q\,B \dfrac{d}{d_\infty - d}}$$

oder umgeformt

$$(4) \qquad A_{th} = \frac{q\,W\,d}{1 + B\,(q-1)\,d}$$

Gleichung (4) gibt, wie zu verlangen ist, für kleine Werte von d die Adsorption q W d und für den Grenzwert der Dichte $d_\infty = 1/B$ den Sättigungswert W/B oder $W\,d_\infty$.

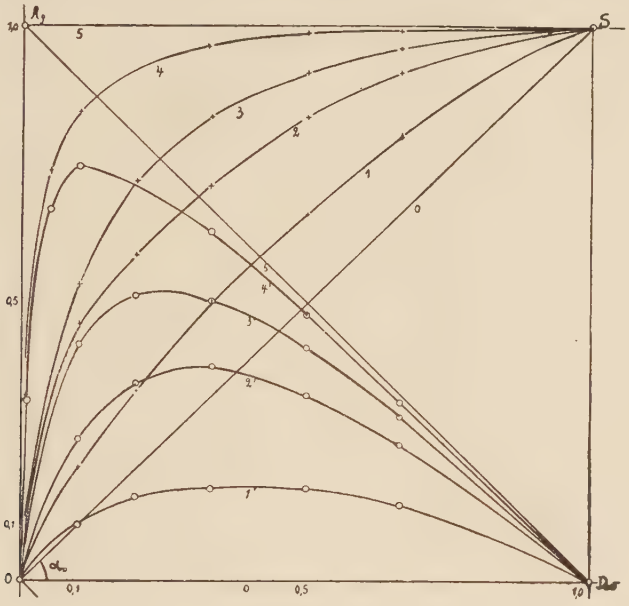

Fig. 7.

Die praktische Adsorption erhält man, indem von dem Wert der theoretischen Adsorption die Gasmenge W d abgezogen wird, also

$$(5) \qquad A_{pr} = \frac{q\,W\,d}{1 + B\,(q-1)\,d} - W\,d$$

In Fig. 7 sind die theoretische und die praktische Adsorption in einem Schema nach den Gleichungen (4) und (5) dargestellt. Zur Vereinfachung sind darin W, B und d_∞ gleich 1 angenommen wor-

den. Durch Variation von q erhält man dann die Isothermen für verschiedene Temperaturen und auch Gase.

Die Gerade OS gibt die Gasmenge an, die 1 cm^3 der Gasphase enthält und zugleich die „theoretische Adsorption", wenn $q = 1$ ist, also die „praktische Adsorption" gleich Null ist. Der Abszissenpunkt D_∞ ist der Grenzwert der Dichte, Punkt S der „Sättigungswert". Für unendlich große Werte von q verläuft die theoretische Adsorption von O nach A_g und von da entlang der Horizontalen A_gS. Die hierzu gehörende praktische Adsorption verläuft zunächst gleichfalls von O nach A_g, von hier aber auf der Geraden nach D. Für einige Zwischenwerte von q sind die Isothermen 1, 2, 3, 4 der theoretischen Adsorption, bzw. 1′, 2′, 3′ und 4′ der praktischen Adsorption eingezeichnet.

Diesem Schema der Adsorption kann man nun folgendes entnehmen:

1. Die praktische Adsorption nähert sich niemals einem Sättigungswert, sondern erreicht nur ein Maximum, um dann auf Null abzusinken.
2. Die früher durch Extrapolation gewonnenen Werte, die man für Sättigungswerte hielt, sind nur Maxima der praktischen Adsorption.
3. Die Maxima der praktischen Adsorption sinken mit steigender Temperatur. Daraus erklärt sich die Abnahme der Werte der Adsorption, die irrtümlich für Sättigungswerte gehalten wurden. Dem Grenzwert „Null" der praktischen Adsorption entspricht dem Sättigungswert der theoretischen Adsorption, der nie experimentell gemessen wird.
4. Die Maxima der praktischen Adsorption stellen immer nur Bruchteile des Sättigungswertes dar. Die Annahme, daß bei Sättigung bei einer bestimmten Temperatur nur ein Teil der Oberfläche des Adsorbens bedeckt ist, wird damit hinfällig.

Diskussion der Versuchsergebnisse.

Ein Vergleich der Stickstoff-, Argon- und Kryptonisothermen der Abbildungen 2., 3. und 4. zeigt qualitativ eine vollständige Übereinstimmung mit dem theoretischen Schema der Abbildung 7. Man erhält keine konstanten Sättigungswerte, sondern nur Maxima und dann Abnahme der Adsorption. Wie die Theorie verlangt, laufen alle Isothermen auf den gleichen Punkt der Abszisse aus. Ebenso nehmen die Maxima mit der Temperatur ab.

Um die Versuchsergebnisse durch die neu abgeleitete Gleichung (5) wiedergeben zu können, ist die Kenntnis der drei Konstanten q, W und B notwendig. Diese kann man aus folgenden drei Bestimmungsgleichungen berechnen:

$$(6) \qquad A_m = \frac{q\,W\,d_m}{1 + B\,(q-1)\,d_m} - W\,d_m$$

$$(7) \qquad \frac{\partial A_m}{\partial d} = \frac{q\,W}{[1 + B\,(q-1)\,d_m]^2} - W = 0$$

$$(8) \qquad B = 1/d_\infty$$

Gleichung (6) erhält man aus Gleichung (5) durch Einsetzen des Adsorptionswertes im Maximum A_m und der hierzu gehörenden Dichte beim Maximum d_m. Gleichung (7) erhält man durch Differentiation von Gleichung (5) und Einsetzen der Werte für die Adsorption beim Maximum A_m und der zugehörigen Dichte d_m. Mit Hilfe dieser drei Gleichungen findet man die Konstanten leicht zu

$$(9) \qquad q = \frac{[1 - B\,d_m]^2}{B^2\,d_m^2} = \frac{\left[1 - \frac{d_m}{d_\infty}\right]^2}{\left[\frac{d_m}{d_\infty}\right]^2}$$

$$(10) \qquad q - 1 = \frac{1 - 2\,B\,d_m}{B^2\,d_m^2} = \frac{1 - 2\,\frac{d_m}{d_\infty}}{\left[\frac{d_m}{d_\infty}\right]^2}$$

$$(11) \qquad W = \frac{A_m\,B}{1 - 2\,B\,d_m} = \frac{A_m}{d_\infty - 2\,d_m}$$

Die folgenden Tabellen enthalten die für Stickstoff, Argon und Krypton berechneten Konstanten. Die Dichte ist in Mol/cm³ und die adsorbierte Menge in Mol pro Gramm Kohle angegeben.

Stickstoff	—104,0° C	—37,5° C	0° C
A_m	0,00785	0,00495	0,00392
d_m	0,00360	0,00558	0,00630
W	0,727	0,724	0,725
q	16,0	4,95	3,45

Für d_∞ wurde der extrapolierte Wert 0,018 eingesetzt. Er ist nur etwa gleich der Hälfte des Wertes der Dichte im kondensierten Zustand.

Argon	—79,5° C	—60,0° C	0° C	50° C
A_m	0,0190	0,0178	0,0125	0,0095
d_m	0,0057	0,0060	0,0072	0,0075
W	2,21	2,22	2,23	2,22
q	6,29	4,31	3,16	2,25

Auch hier wurde der Grenzwert der Dichte d_∞ etwa gleich der Hälfte des Wertes des flüssigen Argons eingesetzt, nämlich $d_\infty = 0.020$ Mol/cm³.

Krypton	—41,5° C	0° C	28° C
A_m	0,0062	0,0067	0,00715
d_m	0,0185	0,0169	0,0156
W	1,453	1,457	1,458
q	9,195	7,460	6,232

Der Grenzwert der Dichte wurde ebenfalls hier etwa gleich der Hälfte des Wertes des flüssigen Kryptons mit $d_\infty = 0{,}025$ Mol/cm³ eingesetzt.

Aus den Werten für den Adsorptionsraum geht hervor, daß er für die verschiedenen Gase verschieden ist.

Mit Hilfe der Konstanten wurden die drei Stickstoffisothermen bei —104,0° C, —37,5° C und 0° C, die —79.5° C Argonisotherme und die —41,5° C Kryptonisotherme berechnet. Das Ergebnis findet sich in den folgenden Tabellen. Es bedeuten darin P der Druck in Kg/cm², d die Dichte in Mol/cm³, A (gef.) der experimentell gefundene Wert der praktisch adsorbierten Gasmenge in Mol Gas pro Gramm Kohle, A (ber.) der berechnete Wert der praktisch adsorbierten Gasmenge ebenfalls in Mol Gas pro Gramm Kohle und A_{th} die theoretische Adsorption in Mol Gas pro Gramm Kohle.

—104,0° C Stickstoffisotherme.

P	d	A (gef.)	A (ber.)	A_{th}
150	0,01196	0,00444	0,00403	0,01268
130	0,01046	0,00503	0,00496	0,01252
110	0,00906	0,00605	0,00577	0,01232
90	0,00752	0,00664	0,00659	0,01204
70	0,00591	0,00712	0,00732	0,01160
50	0,00415	0,00748	0,00782	0,01083
30	0,00254	0,00771	0,00763	0,00948
13	0,00116	0,00671	0,00601	0,00686
3,7	0,000315	0,00411	0,00267	0,00290

—37,5° C Stickstoffisotherme.

P	d	A (gef.)	A (ber.)	A_{th}
150	0,00932	0,00418	0,00422	0,01098
130	0,00844	0,00459	0,00450	0,01061
110	0,00704	0,00480	0,00482	0,00992
90	0,00558	0,00495	0,00495	0,00900
70	0,00466	0,00492	0,00488	0,00826
50	0,00353	0,00462	0,00469	0,00713
30	0,00217	0,00415	0,00370	0,00527
14	0,000880	0,00297	0,00200	0,00264
4,2	0,000221	0,00165	0,000596	—

0° C Stickstoffisotherme.

P	d	A (gef.)	A (ber.)	A_{th}
180	0,00753	0,00385	0,00385	0,00928
160	0,00710	0,00389	0,00388	0,00902
140	0,00628	0,00393	0,00391	0,00845
120	0,00542	0,00389	0,00386	0,00779
100	0,00453	0,00378	0,00372	0,00700
80	0,00364	0,00368	0,00344	0,00608
60	0,00272	0,00343	0,00299	0,00495
40	0,00181	0,00303	0,00232	0,00362
20	0,000903	0,00223	0,00135	0,00201
10	0,000446	0,00134	0,000727	—

—79,5° C Argonisotherme.

P	d	A (gef.)	A (ber.)
190	0,00921	0,0147	0,0156
170	0,00834	0,0167	0,0176
151	0,00746	0,0180	0,0184
115	0,00533	0,0190	0,0190
100	0,00471	0,0187	0,0188
90	0,00421	0,0182	0,0184
80	0,00368	0,0175	0,0178
70	0,00320	0,0166	0,0171
60	0,00273	0,0150	0,0161
30	0,00189	0,0125	0,0134
20	0,00137	0,00979	0,0110
10,	0,000498	0,00653	0,00504

—41,5° C Kryptonisotherme.

P	d	A (gef.)	A (ber.)
160	0,00911	0,0143	0,0173
140	0,00761	0,0175	0,0180
130	0,00695	0,0183	0,0182
120	0,00630	0,0186	0,0183
110	0,00561	0,0185	0,0184
100	0,00506	0,0183	0,0181
90	0,00446	0,0176	0,0177
80	0,00392	0,0167	0,0172
70	0,00334	0,0157	0,0164
60	0,00266	0,0138	0,0150
50	0,00228	0,0124	0,0141
40	0,00184	0,0113	0,0127
30	0,00138	0,00930	0,0107
20	0,000931	0,00747	0,00818
10	0,000501	0,00501	0,00503
1	0,000059	0,00177	0,00069

In der folgenden Tabelle finden sich zum Vergleich die gefundenen und die berechneten Werte der praktischen Adsorption der von L. Coppens [1]) aufgenommenen 20° C CH_4-Isotherme. Die Buchstaben haben dieselbe Bedeutung wie vorhin.

20° C CH_4-Isotherme.

P	d	A (gef.)	A (ber.)	A_{th}
91,9	0,00450	0,0009749	0,0009746	0,001178
141,0	0,00728	0,0009132	0,0009322	0,001261
191,0	0,00982	0,0008184	0,0008558	0,001300
239,7	0,01186	0,0007316	0,0007833	0,001319
285,2	0,01330	0,0006761	0,0007288	0,001330
380,9	0,01556	0,0005888	0,0006414	0,001343

Die Konstanten sind hier:

$A_m = 0{,}0009749$, $d_m = 0{,}004497$,
$W = 0{,}0452$, $q = 33{,}5$.

In Fig. 8 sind die Ergebnisse der drei Stickstoffisothermen graphisch aufgetragen.

Aus folgenden Gründen können wir nicht mehr als eine qualitative Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten erwarten:

1. Die Gleichungen sind unter der Annahme abgeleitet, daß der Verteilungskoeffizient q auf der ganzen Oberfläche des Adsorbens der gleiche ist. Das ist aber bei der aktiven Kohle

nicht der Fall. Im Prinzip bleiben die Gleichungen richtig, nur müßte die tatsächliche Adsorption durch eine Summe solcher Gleichungen mit verschiedenen Werten von q und auch W dargestellt werden.

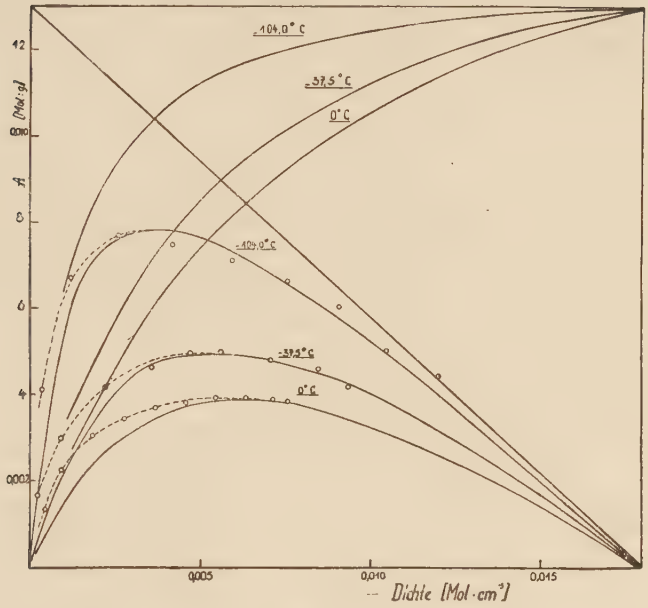

Fig. 8.

2. Die Konstante B ist nicht streng konstant, sondern sinkt vom vierfachen Eigenvolumen der Molekel (und im zweidimensionalen adsorbierten Gas vom zweifachen Eigenvolumen) auf das einfache Eigenvolumen bei sehr hohen Drucken.
3. Die Anziehungskräfte zwischen den Gasmolekeln sind nicht berücksichtigt.

Wie aus den Tabellen der Seiten 43 und 44 hervorgeht, sind die Werte der Adsorptionsvolumina bei ein und demselben Gas und bei verschiedenen Temperaturen als gleich gefunden worden, wie es die Theorie zunächst verlangt. Die Verschiedenheit bei den verschiedenen Gasen kann noch nicht erklärt werden. Daß der Wert von d_∞ nur halb so groß angenommen werden muß, als der Dichte im kondensierten Zustand entspricht, kann mit der Veränderlichkeit von B zusammenhängen. Die Abweichungen in den

aufsteigenden Zweigen der Kurven entsprechen der Inhomogenität der adsorbierenden Oberfläche.

Man kann also sagen, daß die Unterschiede zwischen den berechneten und den gefundenen Werten keinen Widerspruch mit den theoretischen Annahmen bilden. Die vorliegende Theorie kann daher nur als eine erste Annäherung für die Adsorption von hohen Drucken angesehen werden, für die die älteren Theorien vollständig versagten.

Zusammenfassung.

1. Es wurde eine Apparatur zur Messung der Adsorption von Gasen an aktiver Kohle für Drucke von weniger als 760 mm Hg bis zu 200 Kg/cm² konstruiert.
2. Mit dieser Apparatur wurden 14 Adsorptionsisothermen von —79,5° C bis zu 200° C und bei Drucken bis 200 Kg/cm² aufgenommen.
3. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse ergibt sich, daß die praktische Adsorption nach Erreichen eines Maximums wieder sinkt. Die Maxima sind temperaturabhängig und sinken mit steigender Temperatur.
4. Die Theorie von Langmuir über die Adsorption wird ausgebaut und eine Gleichung entwickelt, die die mannigfachen Widersprüche zwischen Theorie und Experiment aufklärt.
5. Die Versuchsergebnisse bestätigen die entwickelte Gleichung und lassen sich, wenn auch noch nicht quantitativ, durch diese wiedergeben.

Literatur.

A. v. Antropoff: „Die Adsorption von Stickstoff bei hohen Drucken". ZS. f. Elektrochemie 39, 616 (1933).

— „Die Adsorption von Argon und Stickstoff von kleinsten bis zu höchsten Drucken", ZS. f. Elektrochemie 42, 544 (1936).

I. W. McBain: „The nature of the sorption by charcoal of gases and vapors under great pressure", Journ. of the amer. chem. Soc. 52, 2198 (1930).

O. Blüh u. N. Stark: „Die Adsorption", Sammlung Vieweg, Heft 93, S. 116.

A. S. Coolidge: „Adsorption under great pressure". Journ. of the amer. chem. Soc. 56, 544 und 561 (1934).

L. Coppens: „Etudes sur la Nature du Gisement des Grisous", Rapport sur les travaux de 1936, Institut National des Mines, Frameries-Paturages, 1937, S. 137.

I. Langmuir: „Die Adsorption von Gasen an ebenen Oberflächen von Glas, Glimmer und Platin", Journ. of the amer. chem. Soc. 40, 1361 (1910).

H. A. Propfe: „Adsorptionsversuche mit Edelgasen", Dissertation Bonn 1932.

F. Steinberg: „Die Adsorption von Stickstoff an Kohle bei hohen Drucken", Dissertation Bonn 1933.

A. Titoff: „Die Adsorption von Gasen durch Kohle", ZS. f. phys. Chem. 74, 641 (1910).

Lebenslauf.

Als Sohn des Lokomotivführers Wilhelm Schaeben und seiner Ehefrau Maria, geb. Schwiers, wurde ich, Leopold Schaeben, am 6. Januar 1911 zu M.-Gladbach geboren.

Vom 6. bis zum 10. Lebensjahr besuchte ich die Volksschule in M.-Gladbach, von Ostern 1921 die dortige Oberrealschule, die ich 1930 mit dem Zeugnis der Reife verließ. In den Jahren 1930—32 studierte ich an der Universität Berlin Chemie, Physik und Mathematik. Von 1932 bis 37 besuchte ich die Universität Bonn, wo ich das 1. und 2. Verbandsexamen und auch das naturwissenschaftliche Staatsexamen ablegte. Die für die erste Prüfungsarbeit des Staatsexamens vorgenommene Untersuchung über die „Adsorption von Gasen an Kohle" wurde im Rahmen der vorliegenden Doktorarbeit fortgesetzt.

Die mündliche Prüfung fand am 23. Juni 1938 statt.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. A. von Antropoff, für das stets große Interesse, das er dieser Arbeit entgegenbrachte, wie auch für die liebenswürdige Unterstützung, herzlich zu danken.